

MANTENIMIENTO DE RUEDAS FERROVIARIAS

ALEJANDRO ZAPATA MEJÍA

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2011

MANTENIMIENTO DE RUEDAS FERROVIARIAS

ALEJANDRO ZAPATA MEJÍA

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

Asesor:

GERMAN RENÉ BETANCUR GIRALDO

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2011

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mis padres por su trabajo, esfuerzo y apoyo durante todos estos años que me han permitido estudiar y salir adelante, además a mis hermanos y mi novia por su constante e incondicional apoyo y preocupación.

Gracias a todos ellos, todos mis logros y metas cumplidas tienen un gran significado para mí, pues me han demostrado que me acompañaran siempre en lo profesional y en lo personal como lo han hecho durante toda mi vida, además como lo hicieron en este proyecto y en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa pública METRO DE MEDELLÍN LTDA y a la UNIVERSIDAD EAFIT por la oportunidad para realizar este proyecto, por todo lo aprendido y por el desarrollo de este.

Agradezco a Germán Betancur, asesor principal del proyecto de grado, por sus importantes aportes durante el desarrollo de este, y por el tiempo y dedicación brindados.

A Julián, técnico de mantenimiento de ruedas, quien me brindó la información y respondió dudas durante la visita a los talleres del Metro de Medellín el 22 de Junio de 2011.

A Michael Vanegas, compañero de estudio de Ingeniería Mecánica, por su incondicional colaboración y apoyo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 GENERAL.....	19
1.2 ESPECÍFICOS.....	19
2. MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	20
2.1 NIVEL INSTRUMENTAL.....	20
2.1.1 Información.	21
2.1.2 Maquinaria y Equipos.....	22
2.1.3 Herramientas, Repuestos, Materias Primas e Insumos.	22
2.1.4 Personal Capacitado.	23
2.2 NIVEL OPERACIONAL.....	23
2.2.1 Acciones Correctivas.....	24
2.2.2 Acciones Preventivas.	24
2.2.3 Acciones Predictivas.	24
2.2.4 Acciones Modificativas.	25
2.3 NIVEL TÁCTICO.....	25
2.3.1 TPM: Mantenimiento Productivo Total.	26
2.3.2 RCM: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.	27

2.3.3	TPM & RCM.....	27
2.3.4	Mantenimiento Proactivo.....	28
2.3.5	Mantenimiento Reactivo.....	28
2.3.6	Mantenimiento de Clase Mundial.	29
2.4	NIVEL ESTRATÉGICO.....	29
2.4.1	Confiabilidad.	30
2.4.2	Mantenibilidad.	30
2.4.3	Disponibilidad.....	30
2.4.4	Costos.	31
2.4.5	Terotecnología y LCC.	31
3.	LAS RUEDAS FERROVIARIAS.....	32
3.1	CLASIFICACIÓN DE LAS RUEDAS FERROVIARIAS.....	35
3.2	CONTACTO RUEDA – RIEL.....	42
3.3	DEFECTOS EN LAS RUEDAS FERROVIARIAS.....	45
3.4	FABRICACIÓN.....	49
3.4.1	Normas de fabricación.	49
3.4.2	Proceso de fabricación.....	52
3.5	MANTENIMIENTO.....	72
3.5.1	Importancia del Mantenimiento.	73
3.5.2	Mantenimiento a nivel mundial.....	74
3.5.3	Inspección de ruedas.	75
3.5.4	Reperfilado de ruedas.	86
4.	METRO DE MEDELLÍN.....	87

4.1	Historia.....	88
4.2	Misión.	89
4.3	Visión.....	89
4.4	Estructura Organizacional.....	89
5.	MANTENIMIENTO DE RUEDAS, METRO DE MEDELLÍN.....	91
5.1	NIVEL INSTRUMENTAL.....	92
5.1.1	Información.	92
5.1.2	Maquinaria y Equipos.....	96
5.1.3	Herramientas, Repuestos, Materias Primas e Insumos.	99
5.1.4	Personal Capacitado.....	104
5.2	NIVEL OPERACIONAL.....	105
5.2.1	Acciones Correctivas.....	106
5.2.2	Acciones Preventivas.....	108
6.	RECOMENDACIONES	116
7.	CONCLUSIONES.....	118
	BIBLIOGRAFÍA	121

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Listado de ruedas para transporte de carga.	40
Tabla 2. Listado de ruedas para transporte de pasajeros.	41
Tabla 3. Clases de ruedas según la AAR.	42
Tabla 4. Clasificación de defectos sobre la banda de rodadura.	47
Tabla 5. Códigos de defectos según la AAR.	48
Tabla 6. Normas de fabricación.	50
Tabla 7. Especificaciones técnicas de las ruedas de pasajeros.	98
Tabla 8. Costos mantenimiento de ruedas.	104
Tabla 9. Tolerancias admisibles en los diámetros de las ruedas.	112
Tabla 10. Límites de operación de la rueda.	113

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Ruedas, Metro de Medellín.....	33
Ilustración 2. Partes principales de una rueda ferroviaria	35
Ilustración 3. Principales tipos de ruedas ferroviarias.	37
Ilustración 4. Diferentes tipos de espesor de llanta.....	38
Ilustración 5. Contacto rueda riel.	43
Ilustración 6. Contacto entre una sección de la rueda de un tren y el riel.....	45
Ilustración 7. Desgaste en la banda de rodadura.....	46
Ilustración 8. Proceso de fabricación de ruedas.	54
Ilustración 9. Proceso de fabricación de llantas.	59
Ilustración 10. Distribución general de una línea de producción.	64
Ilustración 11. Molde de grafito para la fabricación de ruedas.	66
Ilustración 12. Rueda removida del molde.	67
Ilustración 13. Pasos de la fabricación por forja.....	70
Ilustración 14. Galga para la medición de defectos en la pestaña y superficies planas en la superficie de rodadura.	76

Ilustración 15. Galga simple para medir la altura de la pestaña, espesor de la llanta y profundidad de defectos en la superficie de rodadura.	77
Ilustración 16. Calibrador análogo graduable para medir el espesor de llanta o <i>rim thickness</i>	77
Ilustración 17. Galga combinada para medir todos los parámetros de la pestaña, espesor de llanta y defectos en la superficie de rodadura.	78
Ilustración 18. Calibrador análogo graduable para la medición de la profundidad de defectos en la superficie de rodadura.	78
Ilustración 19. Galga para medir la ovalización o pérdida de redondez de la rueda.	79
Ilustración 20. Galga para medir el sobrecalentamiento de la rueda.	79
Ilustración 21. Galga para medir la separación entre las caras internas de las ruedas.	79
Ilustración 22. <i>Miniprof</i> , instrumento para realizar la medición digital del perfil de una rueda.	80
Ilustración 23. Subsistemas del proceso de monitoreo de ruedas.	82
Ilustración 24. Proceso del sistema SCLAR, NEM Solutions.	83
Ilustración 25. Sistema SCLAR, NEM Solutions. Sistema de captura de perfil con visión artificial.	84
Ilustración 26. Sistema PZK, Koltech. Sistema de captura del perfil de rueda con escaneo laser.	84

Ilustración 27. Sistema MRX, MRX Technologies. Sistema de captura de perfil con escaneo laser.....	85
Ilustración 28. Torno para reperfilado de ruedas.	86
Ilustración 29. Organigrama del Metro de Medellín.	90
Ilustración 30. Organigrama del Departamento de Mantenimiento.	91
Ilustración 31. Planilla para el control de la geometría de las ruedas del material rodante.....	95
Ilustración 32. Distribución de una unidad de pasajeros.	96
Ilustración 33. Perfil de rueda NRC.....	97
Ilustración 34. Taller de mantenimiento de ruedas, perfiladora. Metro de Medellín.	100
Ilustración 35. Perfiladora de ruedas, Metro de Medellín.....	100
Ilustración 36. Miniprof, Metro de Medellín.	101
Ilustración 37. Medidor de pestaña.	101
Ilustración 38. Medidor de diámetro.....	102
Ilustración 39. Comparador de caratula.	102
Ilustración 40. Conjunto rueda-eje patrón.	103
Ilustración 41. Flujograma del mantenimiento correctivo.	106
Ilustración 42. Flujograma del mantenimiento preventivo.	108

Ilustración 43. Parámetros de la geometría de la rueda.	109
Ilustración 44. Lazo de viraje en los talleres.	110
Ilustración 45. Medición de la geometría de la rueda.....	113
Ilustración 46. Flujograma de inspección según manual.	114

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AAR: Asociación Americana de Ferrocarriles. *Association of American Railroads*.

AOD: Aprovisionamiento Operación Distribución.

AVE: Alta Velocidad Española.

CM: Coche Motor.

CMA: Coche Motor A.

CMB: Coche Motor B.

CMD: Confiabilidad – Mantenibilidad – Disponibilidad.

CMMS: por sus siglas en inglés, *Computerized Maintenance Management System*.
Sistema de Información de Mantenimiento.

CNC: Control Numérico por Computador.

CPC: *Contact Point Center* (Contacto en el Centro del riel).

CPF: *Contact Point Field* (Contacto en el Exterior del Riel).

CPG: *Contact Point Gauge* (Contacto en el Interior del Riel).

CR: Coche Remolque.

EFE: Empresa de Ferrocarriles del Estado.

ENAC: Entidad Nacional de Acreditación.

HRC: *High Rail Contact* (Contacto alto del riel).

ICE: *InterCityExpress*.

ISO: Organización Internacional para la Estandarización.

JIPM: por sus siglas en inglés, *Japan Institute of Plant Maintenance*. Instituto Japonés de Mantenimiento de Planta.

LCC: Costo del Ciclo de Vida. Por sus siglas en inglés, *Life Cycle Cost*.

MN: Mega Newton.

MTBF: tiempo promedio entre fallas. *Mean Time Between Failures*.

MTTR: tiempo promedio para reparar. *Mean Time to Repair*.

NTMK: *Nizhniy Tagil Iron and Steel Works*

RCM: por sus siglas en inglés, *Reliability Centered Maintenance*. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

RFID: por sus siglas en inglés *Radio Frequency Identification*. Identificación por Radiofrecuencia.

RISAS: por sus siglas en inglés, *Railway Industry Supplier Approval Scheme*.

RSP: *Rail Settlement Plan*. RSP es una división de la Asociación de Compañías Operadoras de Trenes (ATOC).

TAV: Tren de Alta Velocidad.

TPM: por sus siglas en inglés, *Total Productive Maintenance*. Mantenimiento Productivo Total.

TQM: por sus siglas en inglés, *Total Quality Management*. Manufactura de Calidad Total.

UTK: Urzędu Transportu Kolejowego.

VUZ: instituto de Investigación Ferroviaria.

GLOSARIO

BOGIE: Es un conjunto de dos o tres pares de ruedas, según el modelo, montadas sobre sendos ejes próximos, paralelos y solidarios entre sí, que se utilizan en ambos extremos de los vehículos ferroviarios.

CAST: Fundición de hierro.

GALGA: también llamada calibre fijo, el cual es un elemento que se utiliza en el mecanizado de piezas para la verificación de las cotas con tolerancias estrechas cuando se trata de la verificación de piezas en serie

Qr: escarpadura de la pestaña.

RIM THICKNESS: espesor de llanta.

RUEDA: Elemento de conexión entre el vehículo y el carril o riel. Está conformada por la llanta, el velo y el cubo.

Sd: espesor o ancho de la pestaña.

Sh: altura de la pestaña.

WEAR: desgaste, uso.

WROUGHT: Forjado.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos ferroviarios o trenes se caracterizan por tener un guiado automático, proporcionado por el contacto entre rueda y riel. Así, gracias a la geometría del riel y de la rueda, el tren transcurre de forma estable y seguro por la vía.

Durante su uso, las ruedas de los trenes tienden a desgastarse debido al contacto con los rieles. Un desgaste excesivo puede llegar a reducir la forma del perfil de la rueda con el consiguiente riesgo de accidente por descarrilamiento. Hasta ahora, para determinar el estado de la rodadura y su desgaste, las ruedas debían someterse periódicamente a una inspección que determinase el valor de ciertos parámetros geométricos que garantizan la seguridad de su uso (IDEKO, 2011).

El mantenimiento del riel y el perfil de rueda, resulta vital para garantizar una rodadura de calidad, un viaje estable y confortable para los pasajeros. Sobre todo el perfil del tren, que se ve sujeto a diferentes calidades de vía, diferentes perfiles de velocidad, etc. se presenta como punto clave de este análisis.

En la actualidad las ruedas de los trenes sufren grandes desgastes debido a que, durante el frenado, se bloquean las ruedas y éstas se deslizan sobre los rieles. Con estas acciones se generan planos en las ruedas, es decir, zonas lisas en la circunferencia. Cuando las ruedas tienen este tipo de defectos giran con mayor dificultad, transmiten presiones mayores a las vías y sufren las mismas presiones transmitidas. Estos defectos producen problemas relacionados con la seguridad, el confort de los pasajeros y el ruido. Además cuando el defecto ya se ha producido tiende a expandirse rápidamente, por lo que el defecto tiene que ser detectado rápidamente. En la actualidad, esta detección, se realiza visualmente en las tareas de mantenimiento programadas (Fernandez Mariscal & Pulido Lizaso, 2011).

Por otra parte, este Proyecto de Grado está enmarcado dentro de la investigación desarrollada por COLCIENCIAS, el Metro de Medellín y la Universidad EAFIT, denominada “Automatización de la evaluación técnica de ruedas ferroviarias para el Metro de Medellín Desarrollos: DiagnoVisión-Rueda y DiagnoDefecto-Rueda”.

En la actualidad, el Metro de Medellín se encarga de la operación y mantenimiento del sistema metro y metrocable de la ciudad, convirtiéndose en una empresa autosostenible y autocosteable, además ofrece asesoría en materia de mantenimiento y operación de trenes a nivel mundial, siendo esto un ejemplo a seguir por otras empresas del sector ferroviario.

El Metro de Medellín se dedica, entre sus tareas, al mantenimiento de sus trenes y sus vías férreas.

Actualmente el Metro de Medellín ofrece la asesoría en el desarrollo de tecnologías para el diagnóstico, reparación y fabricación de piezas y repuestos para sistemas férreos, gracias a la labor constante y permanente de los ingenieros y técnicos del Metro que hoy cuentan con la experiencia necesaria para ello.

Además para garantizar la operación y mantenimiento del sistema Metro y Metrocable, se cuenta con una serie de equipos que se ofrecen en calidad de arriendo a grandes empresas del sector ferroviario, de suministro de energía y cableados, o del sector industrial, que requieren periódicamente hacer seguimiento al estado de sus equipos y operación (@ Metro de Medellín, 2011).

Por otra parte, el Metro de Medellín cuenta con un amplio portafolio de servicios de mantenimiento de material férreo, es por esto que está en capacidad de realizar, con maquinaria especializada y personal altamente calificado, el perfilado de ruedas de trenes, brindando un servicio con rapidez y agilidad en la entrega de un producto de alta calidad y atendiendo los estándares internacionales.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Analizar a nivel instrumental y operacional el mantenimiento que aplica actualmente el Metro de Medellín a las ruedas ferroviarias.

1.2 ESPECÍFICOS

- Definir el mantenimiento industrial y sus niveles: instrumental, operacional, táctico y estratégico.
- Caracterizar las ruedas ferroviarias.
- Estudiar a nivel instrumental el mantenimiento de las ruedas ferroviarias realizado por el Metro de Medellín.
- Estudiar a nivel operacional el mantenimiento de las ruedas ferroviarias realizado por el Metro de Medellín.

2. MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Las empresas generadoras de bienes y/o servicios que utilizan instalaciones, edificios, máquinas, equipos, herramientas, utensilios, dispositivos, etc., para lograr su objetivo social necesitan que estos activos se mantengan en un estado de funcionamiento, confiabilidad, Mantenibilidad y disponibilidad adecuados a sus necesidades, al procurar que su vida útil sea la máxima posible al mínimo costo; lo que se logra a través del mantenimiento, el cual actúa como una entidad de servicio a la producción. La forma de maximizar la eficacia, la eficiencia, la efectividad y la productividad de los activos, es mediante el conocimiento y aplicación de las leyes que gobiernan la relación entre producción y mantenimiento (Mora Gutiérrez, 2009).

Bajo el enfoque sistémico, el mantenimiento industrial se puede clasificar en los siguientes cuatro niveles: instrumental, operacional, táctico y estratégico.

2.1 NIVEL INSTRUMENTAL

Procura el manejo sistémico de toda la información construida, requerida en un sistema de mantenimiento en lo referente a las relaciones entre personas, recursos productivos y máquinas; pertenecen a este grupo todos los registros, documentos, historia, información, codificación, entre otros; en general todo lo que identifica a los equipos, a los recursos de AOD (Aprovisionamiento Operación Distribución) y de mantenimiento; la administración de la información y su tratamiento estadístico; la estructura organizacional de los tres elementos descritos de un sistema de mantenimiento. Este nivel comprende todos los elementos necesarios para que exista un sistema de gestión y operación de mantenimiento (Mora Gutiérrez, 2009).

Estos elementos de gestión y operación son:

- Información

- Maquinaria y equipos
- Herramientas
- Repuestos
- Materias primas e insumos
- Personal, tanto de producción como de mantenimiento
- Capacitaciones
- Histórico de fallas y reparaciones
- Técnicas de mantenimiento y operación

Las acciones que se realizan en el nivel instrumental, son tareas o labores de plazo inmediato, además este nivel comprende las bases para realizar las labores de mantenimiento y operación de las máquinas.

2.1.1 Información.

La información es una pieza fundamental para el mantenimiento, pues gracias a esta se puede conocer todo acerca de un equipo, pues es la información contenida en bases de datos, sistemas de información, manuales, y en el mismo personal, es quien nos dice como es, como se opera y como se realiza el mantenimiento a dicha máquina. A su vez, la información es la que se encarga de brindarles a las personas, cual es el estado del equipo y cuál es su historia, su hoja de vida, pues es la información quien cuenta la vida.

Por esto, para tener la información adecuada respecto a una máquina, se debe contar con lo siguiente:

- Registro de los equipos con sus partes y componentes.
- Histórico de las órdenes de trabajo y el detallado de cada una de estas.
- Creación y control de órdenes de trabajo.
- Personal capacitado.
- Histórico de mantenimientos, tanto planeado como correctivo.
- Histórico de paros y fallas de los equipos.
- Costos y gastos de operación y mantenimiento.

- Análisis de fallas.
- Planes de mantenimiento.
- Técnicas e instructivos de mantenimientos y operación.

Entonces para manejar el manejo de toda esta información, mantenimiento y producción se apoyan en los sistemas o software de información, tales como los CMMS, los cuales brindan todo ese soporte gerencial ideal para la gestión y control de mantenimiento, pues es en estos CMMS en donde el personal de mantenimiento y producción van a realizar el registro de todos los sucesos de los equipos y así poder retroalimentar las hojas de vidas e historias de estos.

2.1.2 Maquinaria y Equipos.

Considerados factores fundamentales para producción y mantenimiento, pues sin estos, producción no tendría como prestar los servicios o generar bienes, y mantenimiento no tendría a quien prestar sus servicios. Pues son la maquinaria y los equipos quienes le agregan valor a la cadena productiva de una empresa prestadora de servicios o de una generadora de bienes o productos.

2.1.3 Herramientas, Repuestos, Materias Primas e Insumos.

Son elementos básicos para llevar a cabo las tareas correctivas o proactivas de mantenimiento, deben acomodarse a la estrategia y táctica seleccionada, su manejo debe ser coherente con la política general de gestión y manejo de inventarios en especial los insumos y repuestos, debe haber un grado de desarrollo avanzado en estos últimos antes de emprender la realización de planes de mantenimientos planeados y en especial antes de la implementación de cualquier táctica deseada. Los costos asociados a repuestos e insumos son un rubro importante dentro de la inversión y de los gastos habituales normales de mantenimiento, se considera que empresas que desarrollan políticas de manejo de inventarios pueden alcanzar ahorros superiores al 15% mensual en el capital destinado a ello (Mora Gutiérrez, 2009).

Estos elementos se convierten en piezas claves para una óptima ejecución de las labores de mantenimiento y producción, pues sin estos los equipos no tienen sentido y pueden reducir su ciclo de vida o empeorar su estado, en el caso en que estén en falla.

2.1.4 Personal Capacitado.

El personal operativo y administrativo es la piedra angular de mantenimiento, ya que como tal en el enfoque kantiano es uno de los tres elementos básicos del sistema de mantenimiento – máquina – producción y está presente tanto en mantenimiento como producción (Mora Gutiérrez, 2009).

2.2 NIVEL OPERACIONAL

Comprende todas las posibles acciones a realizar en el mantenimiento de equipos por parte del oferente, a partir de las necesidades y deseos de los demandantes. Acciones correctivas, preventivas, predictivas y modificativas (Mora Gutiérrez, 2009).

- Acciones Correctivas: se realizan para dar una solución inmediata a la falla o paro de la máquina; no hay tiempo de planeación ni de pensar en soluciones para evitar la falla en un futuro.
- Acciones Preventivas: se realizan en tiempos de paro de producción o de mantenimiento para evitar que la máquina durante su tiempo de funcionamiento caiga en falla.
- Acciones Predictivas: acciones para diagnosticar a futuro el comportamiento de un equipo y de las fallas que en este se pueden presentar, para evitar la aparición repentina de estas y prolongar la vida útil de las máquinas.
- Acciones Modificativas: son tareas que se realizan con el fin de mejorar los equipos después de ver la repetición de fallas en un mismo sistema o componente de la máquina. Estas acciones son de cierta manera, acciones correctivas.

El nivel operacional comprende tareas de corto plazo, puesto que hay tiempo de análisis de la falla para así poder evitarla o corregirla.

2.2.1 Acciones Correctivas.

Este tipo de acciones o tareas de mantenimiento se realizan con el fin de dar pronta solución a una falla en un equipo, para así recuperar la funcionalidad de este o de un sistema o componente suyo, tras la pérdida de su capacidad para cumplir con sus funciones. En las labores de mantenimiento correctivo se presentan las siguientes tareas en dicho orden:

- Detección de la falla
- Localización de la falla
- Desarme o desmontaje
- Reparación
- Montaje
- Ensayos y pruebas
- Verificación

2.2.2 Acciones Preventivas.

Este tipo de acciones o tareas de mantenimiento se realizan en tiempos de no uso de los equipos, es decir, son acciones realizadas periódicamente y programadas con anterioridad para conocer el estado del equipo y poder realizar tareas para mejorar la funcionalidad de estos y así evitar que caigan en falla durante los tiempos de productividad.

Las labores de mantenimiento preventivo siempre deben ir acompañadas del uso de instrumentos avanzados y básicos que les permitirán a los técnicos u operarios llevar a cabo una mejor ejecución de sus tareas de mantenimiento.

2.2.3 Acciones Predictivas.

Este tipo de acciones o tareas de mantenimiento están basadas en una permanente revisión y análisis del estado de los equipos, lo cual permite realizar diagnósticos del estado de los equipos y su posible comportamiento, y así evitar la aparición de futuras fallas o salidas de funcionamiento en tiempo de productividad de los equipos.

2.2.4 Acciones Modificativas.

Este tipo de acciones o tareas de mantenimiento son tareas no planeadas y son consideradas acciones correctivas, debido a que estas son la solución a esos intentos de mejorar la funcionalidad de un equipo, sistema o componente. Además las acciones modificativas también se realizan con el fin de aumentar la productividad o confiabilidad de un equipo.

2.3 NIVEL TÁCTICO

Contempla el conjunto de acciones de mantenimiento que se aplican a un caso específico (un equipo o conjunto de ellos), es el grupo de tareas de mantenimiento que realizan con el objetivo de alcanzar un fin; al seguir las normas y reglas para ello establecido. Aparecen en este nivel el TPM, RCM, TPM & RCM combinadas, reactiva, proactiva, clase mundial, RCM Scorecard, entre otros (Mora Gutiérrez, 2009).

Este nivel, es el tercer nivel del enfoque sistémico kantiano de mantenimiento, el cual comprende las diferentes formas o filosofías de gestión que puede adoptar una empresa para el manejo y operación de mantenimiento y producción. Este nivel contempla el manejo de acciones a mediano plazo con el fin de aumentar la calidad y competitividad de sus productos o servicios en el medio.

La táctica es la forma en la que las diferentes compañías organizan la ejecución y la administración del mantenimiento de una forma coherente, lógica y sistémica; la implementación de una táctica implica la existencia de normas, leyes, reglas que gobiernan la forma de actuar (Mora Gutiérrez, 2009).

Algunas de las filosofías de mantenimiento que abarca el nivel táctico son:

- TPM: Mantenimiento Productivo Total
- RCM: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
- TPM & RCM
- Proactiva

- Reactiva
- Mantenimiento de Clase Mundial
- Mantenimiento Orientado a Resultados
- Mantenimiento Centrado en Habilidades y Competencias, *Core Competences Maintenance*.
- Mantenimiento Productivo
- Mantenimiento Logístico Integral
- Entre otras

Para que una empresa alcance este nivel de mantenimiento, es decir , el nivel táctico, debe manejar con suficiencia la mayoría de los instrumentos básicos, avanzados genéricos y específicos de mantenimiento y debe comprender las diferentes acciones factibles de realizar; en el evento en que desee implementar cualquiera de las tácticas y tenga falencias en el nivel instrumental, le toca devolverse hasta superar la implementación de las herramientas específicas requeridas para su implementación (Mora Gutiérrez, 2009).

2.3.1 TPM: Mantenimiento Productivo Total.

El TPM, por sus siglas en inglés *Total Productive Maintenance* (Mantenimiento Productivo Total), es una filosofía de mantenimiento que surgió relativamente hace poco en Japón, gracias a los esfuerzos del Instituto Japonés de Mantenimiento de Planta (JIPM), la cual pretende dejar a un lado ese enfoque tradicional del mantenimiento, en el cual unas personas se encargan de producir (operarios) y los otros de reparar (técnicos, eléctricos, mecánicos) cuando se presentan averías; el TPM plantea el trabajo en conjunto de estas dos partes y se les da un papel importante a los operarios y al gerente mismo. El objetivo del TPM es la eliminación de pérdidas en el equipo, llegar a las cero averías, incrementar la productividad y calidad, y la disminución de accidentes y defectos del producto.

El TPM se origina aproximadamente en la década de los 50, cuando los japoneses importan las teorías americanas de mantenimiento (preventivo y proactivo) y las modifican para los modelos de gestión de la industria japonesa. Más adelante, en la

década de los 70, se introduce la estrategia de mantenimiento TQM, por sus siglas en inglés *Total Quality Management*, o también llamado Manufactura de Calidad Total. Y posterior a esto, se incorporó el concepto *Kaisen* o mejora continua.

El TPM como táctica es la más básica de todas, es la pionera en esta rama, sus dos grandes propósitos son: elevar la productividad y aunar esfuerzos del personal de producción alrededor del mantenimiento, aglutinando todo el recurso humano alrededor de la gestión y operación del mantenimiento (Mora Gutiérrez, 2009).

2.3.2 RCM: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

El RCM, *Reliability Centered Maintenance*, es uno de los procesos desarrollados durante 1960 y 1970 con la finalidad de ayudar a las personas a determinar las políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y manejar las consecuencias de sus fallas. Esta táctica de mantenimiento tiene su origen en la Industria Aeronáutica norteamericana, y fue desarrollada con el fin de optimizar los factores humanos y productivos alrededor del mantenimiento, haciendo énfasis en las consecuencias de las fallas como en las características técnicas de las mismas.

El objetivo principal del RCM está en reducir los costos de mantenimiento, para enfocarse en las funciones más importantes de los sistemas, evitando o eliminando acciones de mantenimiento que no son estrictamente necesarias.

El RCM es una técnica de organización de las actividades y de la gestión del mantenimiento para desarrollar programas organizados, que se basan en la confiabilidad de los equipos en función del diseño y de la construcción de los mismos. El RCM asegura un programa efectivo de mantenimiento que se centra en que la confiabilidad original inherente al equipo se mantenga (Mora Gutiérrez, 2009).

2.3.3 TPM & RCM.

El TPM & RCM combinados dan a las organizaciones la ventaja de mejorar muchos de sus procesos y facilitar el trabajo en equipo entre mantenimiento y producción, además reduce notablemente esa barrera entre las dos áreas mencionadas

anteriormente, y así mejorar la confiabilidad y reducir los costos de operación y mantenimiento de los equipos. Ambas tácticas son excluyentes y complementarias, pues mientras el TPM aumenta la productividad, el RCM aumenta la confiabilidad y la competitividad.

2.3.4 Mantenimiento Proactivo.

Esta táctica de mantenimiento, el mantenimiento proactivo, está dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de los equipos. Una vez que las causas que generan el desgaste han sido localizadas, no se debe permitir que éstas continúen presentes en la maquinaria, ya que de hacerlo, su vida y desempeño, se verán reducidos. La longevidad de los componentes del sistema depende de que los parámetros de causas de falla sean mantenidos dentro de límites aceptables, es decir, que los parámetros de causas de falla están dentro del rango de severidad operacional que conducirá a una vida aceptable del componente en servicio, utilizando una práctica de "detección y corrección" de las desviaciones según el programa de Mantenimiento Proactivo.

2.3.5 Mantenimiento Reactivo.

No debe entenderse la táctica reactiva como las actividades que desarrolla una empresa para organizar sus acciones correctivas deficientes e inadecuadas, es una táctica interesante para aquellas organizaciones industriales y de servicio, que no permanecen mucho tiempo con sus equipos, que son desarrolladoras o usuarias de tecnologías avanzadas, que sus productos y áreas de negocio cambian constantemente, por lo cual necesitan crear una infraestructura y aprender habilidades y competencias que les permitan reaccionar rápidamente ante las nuevas fallas y situaciones complejas de mantenimiento; son empresas que tienen la particularidad de atender en forma oportuna las necesidades de mantenimiento. Ideal para empresas nuevas que no permanecen mucho tiempo con los mismos equipos (Mora Gutiérrez, 2009).

2.3.6 Mantenimiento de Clase Mundial.

Esta táctica de mantenimiento, utiliza como herramienta el benchmarking para alcanzar mejores costos, mejor productividad y máxima competencia mediante el mejoramiento continuo. En esta táctica aparecen presentes conceptos como la planeación, prevención, detección temprana de fallas, análisis de pérdidas de producción y mantenimiento, información y documentación técnica, y estos apoyados de los ya nombrados sistemas de información o CMMS, además de la búsqueda del cambio de la actitud operacional en todas las áreas de la empresa. Además es una táctica que está centrada en el cumplimiento de normas técnicas y en la solución de problemas y eliminación de puntos débiles, apoyándose de capacitaciones al personal y de una buena reestructuración organizacional y cultural.

2.4 NIVEL ESTRATÉGICO

El campo estratégico está compuesto por las metodologías que se desarrollan con el fin de evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas desarrolladas; esto implica el establecimiento de índices, rendimientos e indicadores que permitan medir el caso particular con otros de diferentes industrias locales, nacionales o internacionales. Es la guía que permita alcanzar el grado de éxito propuesto. Se alcanza mediante el LCC, el CMD y los Costos. (Mora Gutiérrez, 2009)

El nivel estratégico abarca el manejo de costos e índices o indicadores para la medición y avance de las gestiones. Esto se ve reflejado en el manejo de CMD o Confiabilidad – Mantenibilidad – Disponibilidad y a su vez en los costos y administración de el LCC o Costo del Ciclo de Vida de los equipos. Con este nivel se alcanza la calificación o cuantificación del éxito de las gestiones de mantenimiento y a su vez de producción.

Otros índices usados a este nivel son:

- Indicadores
- Gestión de Activos
- MTTR, Tiempo Medio Para Reparar

- MTBF, Tiempo Medio Entre Fallas

2.4.1 Confiabilidad.

La capacidad que tiene un equipo de realizar su función de la manera prevista, es decir, es la probabilidad de que un equipo cumpla con sus funciones predeterminadas sin incidentes, paros o fallas en un período de tiempo especificado y dentro de los límites para los cuales está diseñado. Depende del diseño propio del equipo, su puesta en marcha, operación y mantenimiento.

Valora las acciones que ejecuta producción sobre el manejo y operación de los equipos, desde la óptica de fabricación y explotación de los mismos, las medidas fundamentales en que se apoya son las cantidades y los tiempos de fallas inherentes a los equipos (Mora Gutiérrez, 2009).

2.4.2 Mantenibilidad.

Depende del diseño del equipo y es la probabilidad que tiene este de poder realizarle tareas de mantenimiento. Depende de la frecuencia, facilidad y costos del mantenimiento.

Mide las actividades de reparaciones y tareas proactivas que realizan el área de mantenimiento sobre los equipos, sus medidas básicas son el volumen de reparaciones o tareas planeadas y los tiempos efectivos de realización y sus demoras, en el caso de la Mantenibilidad la evaluación se asocia a los grupos de personas que hacen los mantenimientos o las reparaciones (Mora Gutiérrez, 2009).

2.4.3 Disponibilidad.

Este índice está definido como la probabilidad de que un equipo se encuentre listo y disponible para trabajar en el momento requerido. La disponibilidad depende de los dos índices anteriormente mencionados.

Es una relación que muestra la proporción de tiempo útil efectivo frente al tiempo total disponible (Mora Gutiérrez, 2009).

2.4.4 Costos.

Como su nombre lo dice “costos”, o también llamados gastos, los cuales están asociados a la disponibilidad, producción, mantenimiento, tecnología e inversiones, los cuales pueden ser de corto, mediano o largo plazo.

2.4.5 Terotecnología y LCC.

Este término involucra tres aspectos muy importantes que actúan en el éxito de una compañía, los cuales son la ingeniería, administración y finanzas, además esta ciencia es la encargada de integrar todos los aspectos del enfoque kantiano de mantenimiento, a través de ella se alcanza la integración de todos los niveles de mantenimiento junto con el CMD. Por otra parte, es aquí en donde se trabaja en su totalidad el término LCC (*Life Cycle Cost* por sus siglas en ingles) que hace referencia al costo del ciclo de vida de los equipos, y permite valorar la situación económica de estos su viabilidad técnica y financiera a lo largo de su ciclo de vida.

3. LAS RUEDAS FERROVIARIAS

La rueda es probablemente el componente más simple e importante usado en la industria ferroviaria. Aunque la rueda ha cambiado muy poco su apariencia y forma desde su primer uso, esta ha sufrido una serie de perfeccionamientos para poder satisfacer las demandas del mercado actual. Como siempre ha sucedido, con los cambios llegan una serie de preguntas con lo que respecta a su costo, durabilidad y seguridad. Estas preocupaciones son factores que siempre deberán ser considerados en el avance de este medio de transporte.

En general la evolución de las ruedas, junto con los coches, vía y locomotora, ha tenido como resultado mejores equipos y tecnología a la industria ferroviaria. Algunos de los beneficios que se han obtenido de estas mejoras son:

- Mayor seguridad.
- Disminución del mantenimiento.
- Aumento en el tiempo de operación, disponibilidad.
- Mayores velocidades.
- Mayor capacidad de carga.
- Mayor comodidad para el manejo de carga.
- Mejoramiento en la frecuencia de programación.

A pesar de todos los avances y beneficios brindados por las ruedas modernas, esta aun sigue cumpliendo con las siguientes funciones principales:

- Soportar el coche sobre la vía y permitir su desplazamiento sobre esta.
- Conducir el coche o vagón y seguir su vía.
- Actuar como una superficie de frenado para las zapatas de frenado.

Estas funciones están relacionadas. Actualmente los ingenieros deben considerar cuidadosamente estas funciones a la hora de realizar mejoras en el diseño de las ruedas. Nuevas tecnologías serán empleadas para llevar a cabo el mejoramiento en el diseño de la rueda, siempre y cuando la industria ferroviaria siga demandando el perfeccionamiento de esta.

Ilustración 1. Ruedas, Metro de Medellín.



(@ Metro de Medellín, 2011)

El modo de desplazamiento que se utiliza en la mayoría de los casos en los trenes, es el de la rueda enteriza de acero rodando sobre un riel igualmente de acero, a excepción de reducidos casos en los que se utiliza para su desplazamiento ruedas dotadas de llantas o fenómenos de electromagnetismo.

La función de las ruedas de tren es la de sustentar, guiar, transmitir al riel los esfuerzos, lograr circular en curvas y frenar. Cada una de estas funciones induce esfuerzos mecánicos y térmicos en las ruedas.

Actualmente todos los países que poseen este medio de transporte demandan cada vez más el uso de trenes de alta velocidad. Este tipo de trenes están sometidos a mayores cargas, lo que unido a que en el pasado se han producido algunos accidentes, conduce a la exigencia de unas inspecciones más rigurosas y menores intervalos de inspección para los componentes críticos, entre los que se encuentran las ruedas. La seguridad en los trenes es primordial, siendo en el caso de alta velocidad, crítica. La aparición de fisuras en las ruedas puede afectar de forma considerable a la seguridad, ya que estas pueden causar un descarrilamiento del tren.

Para evitar los posibles daños que puede acarrear un descarrilamiento, como son pérdidas humanas, pérdidas económicas, problemas medioambientales y miedo en los viajeros y transportistas, se hace necesaria la inspección periódica del estado de las ruedas, tanto de su geometría, como de la aparición de fisuras o defectos en el material.

Se deben tener en cuenta el material de las ruedas, su grado de limpieza para evitar que las fisuras empiecen a crecer a partir de defectos existentes en dicho material y los métodos de ensayo acorde a los criterios de la mecánica de fractura para ruedas ferroviarias.

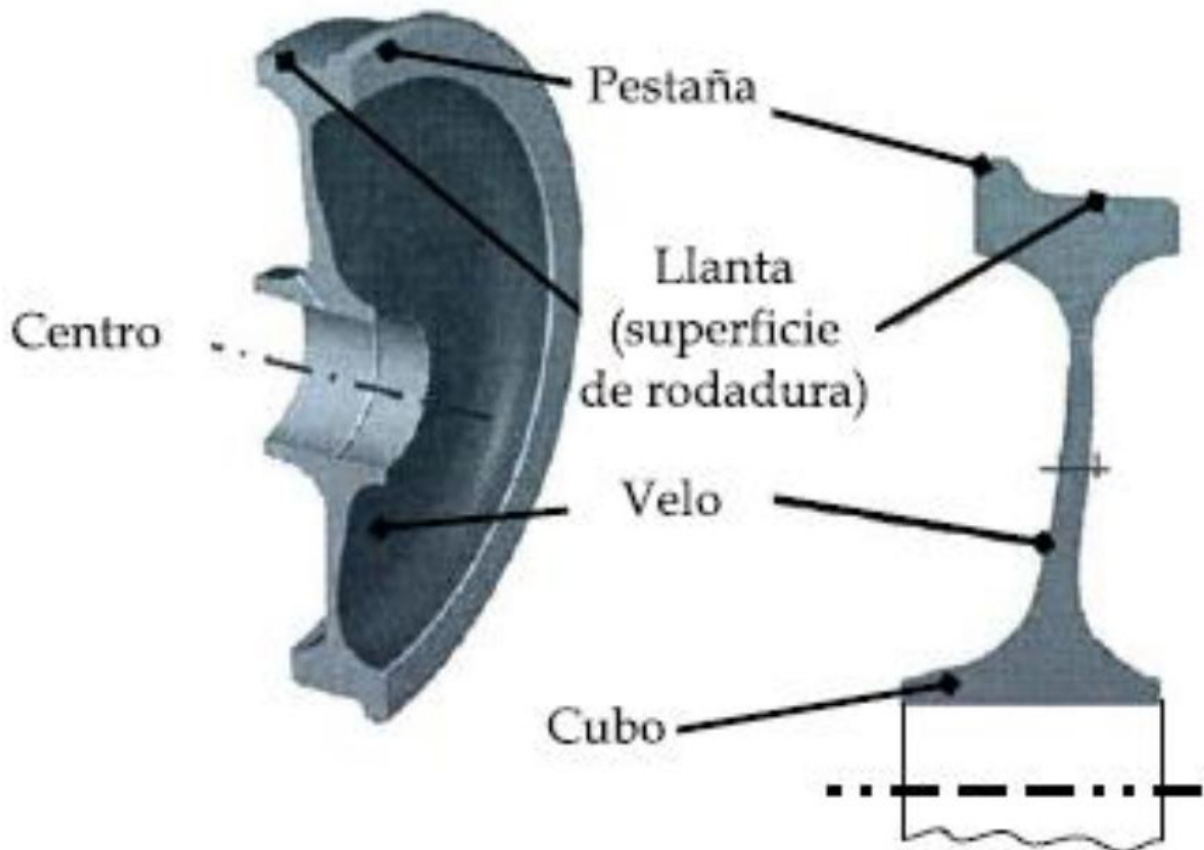
Ruedas y ejes son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Fallos mecánicos o abusos en las dimensiones de diseño pueden causar descarrilamientos.

En la actualidad hay gran cantidad de fabricantes de ruedas, clases y diseños, pero independiente de esto, las principales partes que componen una rueda ferroviaria, son la llanta, el cubo y el velo, las cuales se pueden observar en la siguiente ilustración.

- Cubo: establece la unión entre la rueda y el eje.
- Velo: corona metálica de unión entre la llanta y el cubo.
- Llanta: corona de acero con tratamiento térmico, cuya superficie exterior es la banda de rodadura.

- Pestaña o Brida: aro saliente al borde de la llanta que impide el descarrilamiento.

Ilustración 2. Partes principales de una rueda ferroviaria



(Vasauskas, Bazaras, & Čapas, 2005)

Por décadas, el velo fue manufacturado como un componente recto que conecta la llanta y el cubo. Ingenieros encontraron que usando un velo curvo en lugar de un velo recto o cónico, se reduciría la probabilidad de desarrollar defectos en las ruedas (The Railway Educational Bureau, 2008).

3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS RUEDAS FERROVIARIAS

Las ruedas pueden clasificarse como sólidas o enterizas, llanta y tipos ensamblados como se muestra en la siguiente ilustración.

Las ruedas sólidas (Ilustración 3a) tienen tres elementos destacados: llanta, velo y el cubo, y principalmente difieren unas de otras en la forma del velo.

Las ruedas de llanta (Ilustración 3b) tienen una llanta ajustada al velo de la rueda que puede ser reemplazado cuando está alcance su límite máximo de perfilado.

Las ruedas tienen distintos tipos de velo como rectos, cónicos, con forma de S, de radios o corrugados cuando se ven a través de una sección de corte. Un disco recto reduce el peso de la construcción y puede ser formado de manera que el espesor del metal corresponde al nivel de tensión local sometido. Los discos con forma cónica y forma de S sirven para incrementar la flexibilidad de la rueda, reduciendo por tanto las fuerzas de interacción entre las ruedas y los carriles. Los discos corrugados tienen mejor resistencia a las inclinaciones laterales.

La necesidad de reducir las fuerzas de interacción rueda-carril, ha conducido al desarrollo de ruedas elásticas (Ilustración 3c) que incorporan una capa de material con bajo módulo de elasticidad (goma, poliuretano). Esto ayuda a atenuar las fuerzas que actúan con frecuencias elevadas en la interacción rueda-carril.

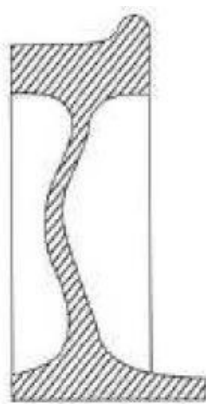
La mejora de la fiabilidad de los rodamientos despierta interés en las ruedas con rotación independiente proporcionando reducciones significativas en las masas rodantes debido a la eliminación del eje. Con el desacoplamiento de las ruedas, la rotación independiente del eje montado inevitablemente elimina la mayoría de las fuerzas de guiado en el eje montado. Tales ejes montados han encontrado aplicación en cualquier ancho de vía variable proporcionando al material rodante una rápida transición desde un ancho de vía a otro o en transporte urbano por carril donde es necesario un nivel bajo del suelo de los vehículos.

Como se mencionó anteriormente, existen 3 tipos básicos o principales de ruedas ferroviarias. Estos principales tipos de ruedas se clasifican en enterizas, solidas o monobloque; de llanta o de centro y bandaje; y elásticas o de ensamble. En la siguiente ilustración se pueden observar estos 3 tipos de ruedas.

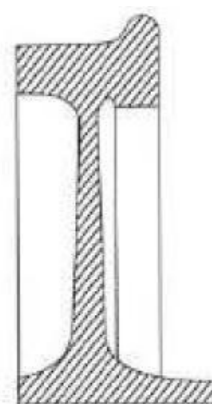
Ilustración 3. Principales tipos de ruedas ferroviarias.



Velo cónico

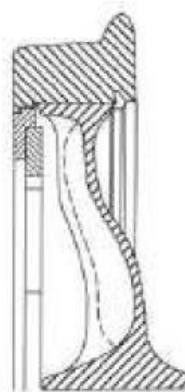
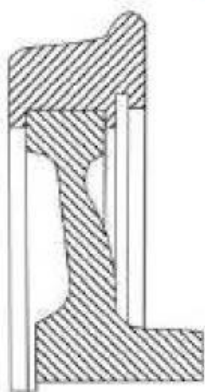


Velo curvo o en S

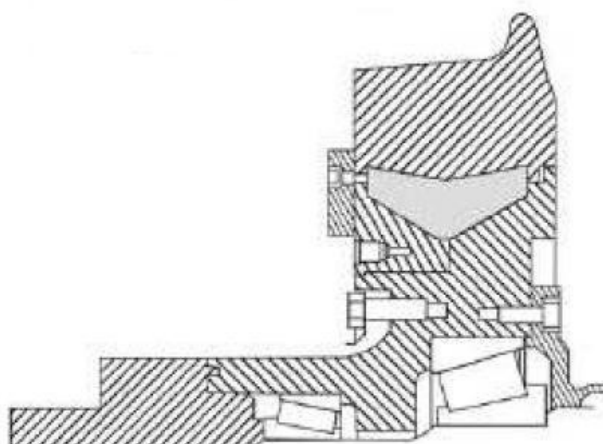
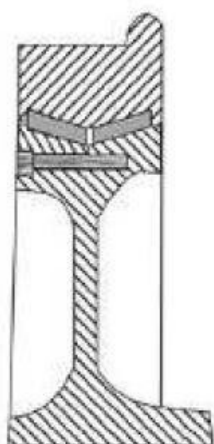


Velo recto

a) Ruedas sólidas o enterizas



b) Ruedas de llanta



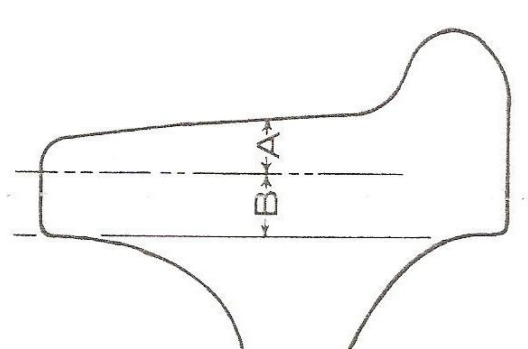
c) Ruedas elásticas ó de montaje

(Herreros Garrido, 2010)

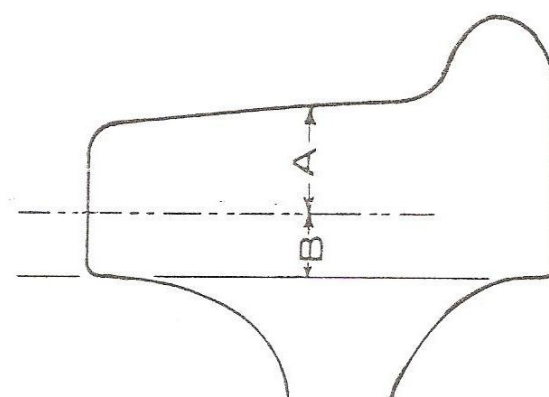
La Asociación Americana de Ferrocarriles (AAR) establece la clasificación de las ruedas dependiendo del espesor de la llanta (*rim thickness*). Dado el desgaste normal, el espesor de la llanta determina cual será el tiempo de vida útil de la rueda. Existen básicamente 3 tipos de *rim thickness*: *one-wear* (de un desgaste), *two-wear* (de dos desgastes) y *multiple-wear* (de múltiples desgastes). Debido al desgaste natural de la rueda, la llanta pierde su forma o perfil original. Dependiendo del espesor de la llanta, la rueda puede ser reperfilada y así incrementar su tiempo de vida útil.

Las ruedas *one-wear* fueron introducidas a la industria ferroviaria en 1925, y al año siguiente fue introducida la rueda *two-wear* (The Railway Educational Bureau, 2008).

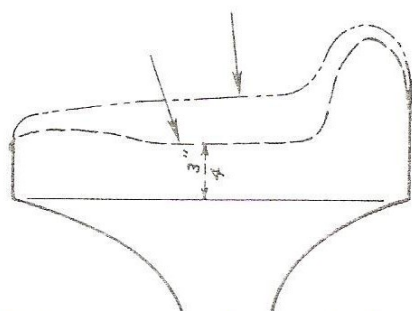
Ilustración 4. Diferentes tipos de espesor de llanta.



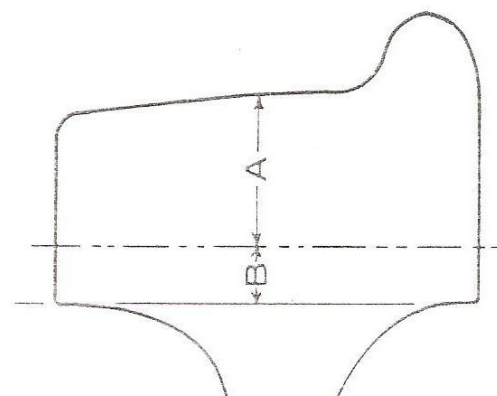
a) Rueda con perfil de 1 desgaste



b) Rueda con perfil de 2 desgastes



c) Contorno nuevo y desgastado de una rueda de 33 in con perfil de 1 desgaste



d) Rueda con perfil de multiples desgastes

(The Railway Educational Bureau, 2008)

- *One-wear wheels* (ruedas con perfil de 1 desgaste): en la ilustración 4a de la ilustración anterior se puede observar el perfil de una rueda *one-wear*, es decir, una rueda a la cual es muy difícil realizarle 1 reperfilado. Las ruedas *one-wear* pueden ser usadas hasta que su desgaste alcance el límite o mínimo diámetro permitido. Una vez se haya alcanzado el límite permitido, las ruedas tienen o deben ser retiradas de servicio.
- *Two-wear wheels* (ruedas con perfil de 2 desgastes): el uso de este tipo de ruedas es recomendado para el transporte de carga, ya que su diseño permite que la rueda pueda ser reperfilada al menos una vez durante su vida útil. Estas ruedas están diseñadas específicamente para tener una llanta de suficiente espesor, la cual después de su desgaste permite ser reperfilado para poder continuar prestando su servicio. Por lo general este tipo de ruedas no pueden ser reperfiladas por segunda vez debido a su desgaste. Ver la ilustración 4b de la ilustración anterior.
- *Multiple-wear wheels* (ruedas con perfil de múltiples desgastes): este tipo de ruedas son usadas en locomotoras y coches de pasajeros, ya que estas son diseñadas con suficiente espesor de llanta para poder ser reperfiladas gran cantidad de veces antes de que cumplan su vida útil y ser retiradas de servicio. Este tipo de ruedas las podemos observar en la ilustración 4d de la ilustración anterior.

Independiente del tipo de rueda que se tenga, esta puede entrar en un estado defectuoso de muchas maneras. Cuando esto sucede, la rueda debe ser reperfilada o retirada de servicio dado el caso. Una causa común del desgaste de las ruedas se da cuando esta gira a lo largo de la vía.

Según la AAR, las ruedas deben ser removidas cuando alcanzan el límite máximo permitido, que para el caso de las ruedas de 840 mm (33 in) de diámetro el espesor mínimo (B, ilustración anterior) debe ser de 20 mm (3/4 in), y cuando alcanza este mínimo o menos de este la rueda debe salir de servicio. Para las ruedas de 710 mm (28 in), 920 mm (36 in) y 970 mm (38 in) de diámetro las ruedas deben ser retiradas

de servicio cuando alcanzan un “B” igual o menor a 22 mm (7/8 in). En la ilustración 4c de la ilustración anterior se puede observar el perfil desgastado y el perfil nuevo, y es allí donde de una manera gráfica se puede ver claramente porque una rueda no puede ser reperfilada cuando llega a los 20 mm (3/4 in) de espesor.

Las siguientes tablas muestran los diferentes tipos de ruedas tanto para trenes de carga como de pasajeros según la AAR. Estas tablas muestran la letra que indica el diseño seguida del diámetro nominal para ruedas fabricadas por forja (*wrought*) y fundición (*cast*), el tipo de espesor (*one-wear*, *two-wear* and *multiple-wear*), y la capacidad nominal de carga.

El número que le sigue a la letra que determina el diseño indica el diámetro nominal en pulgadas (in). La capacidad nominal de carga es en toneladas y aplica para coches de 4 ejes u 8 ruedas. La designación 1-W, 2-W y M-W indican respectivamente que la rueda es *one-wear*, *two-wear* y *multiple-wear*.

Tabla 1. Listado de ruedas para transporte de carga.

Designación del Diseño de la Rueda		Tipo de Llanta	Toneladas de Capacidad
Forjado	Fundición		
A-28	CA-28	M-W	100
	CB-28	1-W	No más de 24.375 libras por rueda
	CD-28	1-W	
E-28	CE-28	1-W	
P-33	CP-33	M-W	50 – 100
A-30	CA-30	M-W	100
AX-30	CAX-30	M-W	50
A-33	CA-33	1-W	50
G-33	CG-33	M-W	50 – 100
J-33	CJ-33	1-W	50 – 70
K-33	CK-33	2-W	50
M-33	CM-33	2-W	50 – 70
N-33	CN-33	M-W	50

Designación del Diseño de la Rueda		Tipo de Llanta	Toneladas de Capacidad
Forjado	Fundición		
R-33	CR-33	M-W	50 – 70
H-36	CH-36	1-W	100
J-36	CJ-36	2-W	100
K-36	CK-36	M-W	100
B-38	CB-38	1-W	125
C-38	CC-38	2-W	125
D-38	CD-38	M-W	125

(The Railway Educational Bureau, 2008)

Tabla 2. Listado de ruedas para transporte de pasajeros.

Designación del Diseño de la Rueda		Tipo de Llanta	Toneladas de Capacidad
Forjado	Fundición		
A-32	CA-32	M-W	No más de 22.125 libras. por rueda para todas las designaciones
A-34	CA-34	M-W	
A-36	CA-36	M-W	
B-36	CB-36	M-W	
C-33	CC-33	M-W	
D-36	CD-36	M-W	
E-36	CE-36	M-W	
G-36	CG-36	M-W	
M-36*	CM-36*	M-W	
*Ver S-657, Sección G, <i>Manual de Ruedas y Ejes</i> , para otros datos.			

(The Railway Educational Bureau, 2008)

La siguiente tabla muestra la comparación de las diferentes clases de rueda, su tratamiento térmico, contenido de carbón, y el tipo de servicio para el cual puede ser usada la rueda (carga o pasajeros).

Tabla 3. Clases de ruedas según la AAR.

Clase	Tratamiento térmico	Rango de dureza	Porcentaje de carbón*	Tipo de servicio a prestar
L	Llanta	197 – 277	<0.047	Trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones más severas de frenado que las otras clases y para cargas ligeras.
A	Llanta	255 – 321	0.47 – 0.57	Trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones severas de frenado y para cargas moderadas.
B	Llanta	277 – 341	0.57 – 0.67	Trenes de carga, trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones severas de frenado y para cargas pesadas. Recomendada para locomotoras. Buena combinación de dureza y fragilidad.
C	Llanta	321 – 363	0.67 – 0.77	Trenes de carga; trenes de alta velocidad para pasajeros con condiciones suaves de frenado y para cargas pesadas; trenes de pasajeros con condiciones de duro frenado donde la banda de rodadura sufre. Recomendada para locomotoras. Más resistente a bombardeos pero se rompe con mayor facilidad debido a que es muy frágil.
U	Sin tratamiento térmico	N/A	N/A	Ya no se producen.

* La mezcla de acero varía principalmente por el contenido de carbono, sin embargo, a cada cantidad química se le permite variar un poco. La composición química incluye manganeso (0,60 - 0,85%), fósforo (<0,05%). de azufre (<0,05%) y silicio (> 0,15%).

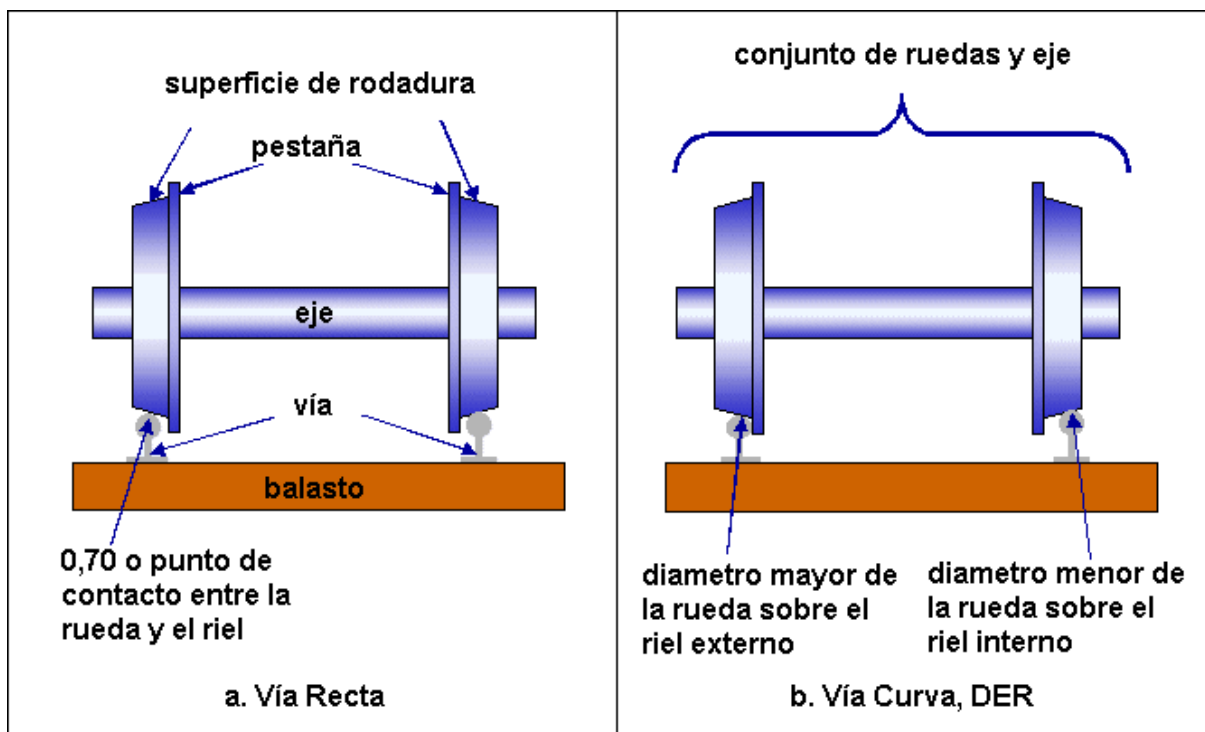
(The Railway Educational Bureau, 2008)

3.2 CONTACTO RUEDA – RIEL

Las ruedas ferroviarias se apoyan sobre los rieles sin algún tipo de guía, excepto por la forma de las llantas en relación con la cabeza de los rieles. Contrario a lo que se

cree, las pestañas no deben tocar los rieles, pues estas son sólo un último recurso para evitar que las ruedas se descarrilen, siendo esto una característica que brinda seguridad. Las llantas ferroviarias son cónicas y la cabeza del riel presenta una ligera curvatura en su geometría tal y como se muestra en la siguiente ilustración. El grado de conicidad es fijado por la empresa ferroviaria y varía de un lugar a otro. En el Reino Unido el ángulo se fija en 1 de cada 20 ($1/20$ ó 0.05). En Francia es de $1/40$. El ángulo se puede usar hasta un mínimo de 1 en 1.25 antes de la rueda ser reperfilada (@Railway Technical Web Pages, 1998-2011).

Ilustración 5. Contacto rueda riel.



(@Railway Technical Web Pages, 1998-2011)

Esta ilustración permite observar el principio de contacto rueda-riel en vía recta y es importante tener en cuenta que las bridas o pestañas no suelen hacer contacto con los rieles.

Sobre la vía curva, la rueda exterior tiene una mayor distancia que recorrer que la rueda interior. Para compensar esto, el juego de ruedas se mueve lateralmente en

relación con la vía de manera que el radio mayor de la llanta sobre el borde interno de la rueda es usado en el carril exterior de la curva, tal y como se muestra en la ilustración 5b.

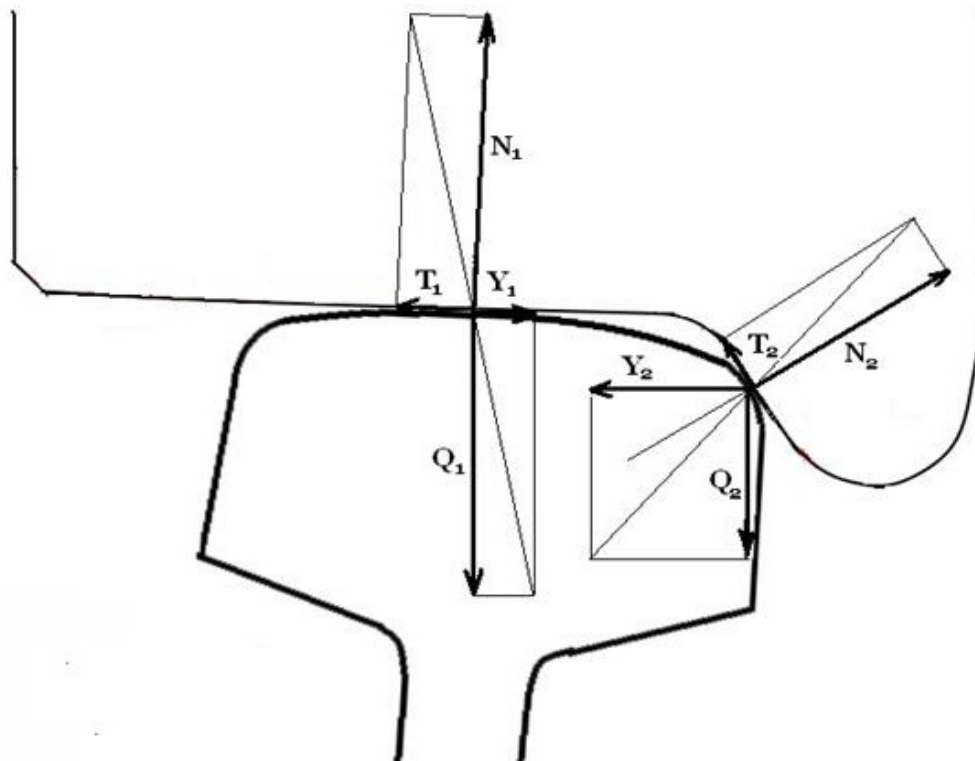
La rueda interior utiliza el borde externo de las llantas para reducir la distancia recorrida durante el paso por la curva. La pestaña de la rueda externa sólo va a tocar el movimiento de tren pasando por el riel curvo del carril curva sin estar en contacto simétricamente la geometría del riel y la rueda. Esto puede ocurrir debido a la velocidad incorrecta o mal estado mecánico de la pista o del tren. A menudo causa un chillido. Como es natural, causa un desgaste.

Muchos conductores de tren usan la pestaña o el riel de engrase para facilitar el paso de las ruedas en las curvas. Los dispositivos pueden ser montados en la vía o el tren. Es importante asegurarse de que la cantidad de lubricante que se aplica es exactamente correcto. Demasiado lubricante hará que las llantas se contaminen, lo cual causaría deslizamiento y desgaste de la curvatura de llanta, es decir, aparecerán planos o superficies planas en la curva o superficie de rodadura.

Siempre habrá algún deslizamiento entre la rueda y el riel en las curvas, pero esto va a ser minimizado si la vía y la rueda son construidas y mantenidas según las normas.

La siguiente ilustración muestra cómo es el contacto entre una sección del riel y una sección de una rueda de tren. En este caso, se observa un momento en el que además de existir contacto en la zona de rodadura, zona 1, existe contacto en la zona de la pestaña o brida, zona 2, que es la parte de la rueda que limita el desplazamiento lateral del tren sobre la vía. En la imagen, se pueden apreciar también las fuerzas producidas en cada punto de contacto (Conde Mellado, 2011).

Ilustración 6. Contacto entre una sección de la rueda de un tren y el riel.



@ NEM Solutions (Conde Mellado, 2011)

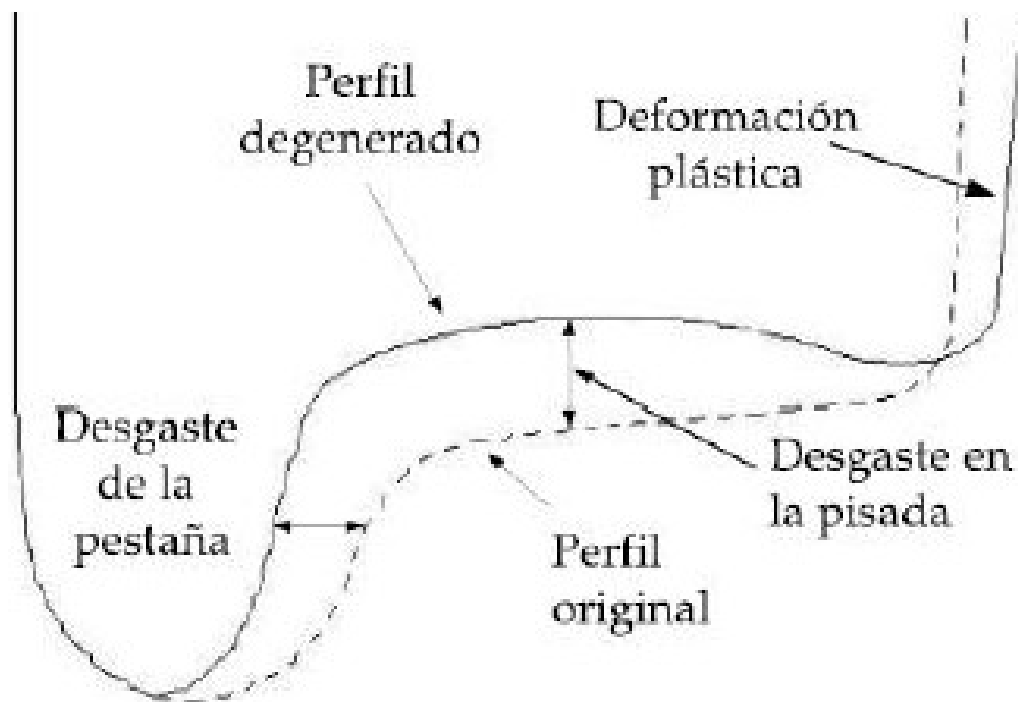
3.3 DEFECTOS EN LAS RUEDAS FERROVIARIAS

Las ruedas pueden presentar diferentes tipos de daños sobre la banda de rodadura, que es la zona de mayor interés por estar permanentemente expuesta a demandas mecánicas y a desgastes (Zakharov, 2001). Dado esto, los defectos en las ruedas se pueden clasificar en 4 grupos principales.

- Desgaste: daño asociado a mecanismos de rozamiento que alteran el perfil original de la rueda, que influye en el desgaste tanto en dirección axial como circunferencial (Kang & Lee, 2004).
- Deformación: el perfil de la banda de rodadura pierde su geometría original a consecuencia de altas presiones de contacto o materiales no homogéneos. Puede darse en toda la circunferencia o en zonas determinadas y, frecuentemente, se asocia a un desgaste excesivo en el que pueden producirse efectos de delaminación y de deformación plástica (Lewis, 2003, 2002, 2004).

- **Fatiga:** es el efecto más importante y frecuente en la banda de rodadura. Se produce por las demandas mecánicas de compresión y tracción a las que se somete la llanta con el tren en movimiento. La fatiga del material da lugar al desarrollo de grietas que pueden llevar a una posterior pérdida de material en la banda de rodadura (exfoliación). La presencia de planos, además del deterioro producido en el material por sobrecalentamiento durante su formación, produce fuerzas de impacto que aumentan los esfuerzos de fatiga en sus regiones próximas (Brizuela, 2011).
- **Térmico:** el deslizamiento de la rueda por falta de adherencia al carril durante operaciones de frenado puede causar un calentamiento que excede el límite térmico del material, cambiando su fase. El posterior enfriamiento puede dar origen a la formación de martensita, mucho más frágil, y al desarrollo de grietas. La posterior pérdida de material en la banda de rodadura da origen a excoriaciones. Desde el punto de vista geométrico, el deslizamiento da lugar a la formación de uno o varios planos (Brizuela, 2011).

Ilustración 7. Desgaste en la banda de rodadura.



(Brizuela, 2011)

Ahora bien, independiente del tipo de daño que presente una rueda en cualquiera de sus partes, esta puede presentar una serie de combinación de defectos.

Frecuentemente, el origen puede ser la formación de un plano, con el consiguiente daño térmico que dará lugar a escoriaciones; las fuerzas de impacto producidas por dicho plano, aumentan los esfuerzos de fatiga, dando lugar a la formación de grietas y exfoliaciones. De este modo, un único defecto inicial puede ser causa de múltiples daños, lo que subraya la importancia de detectar y corregir los defectos en sus fases tempranas (Brizuela, 2011).

Según el estándar británico GM/GN2497 no todos los defectos se consideran críticos. En la siguiente tabla se puede observar cuando un defecto es considerado crítico.

Tabla 4. Clasificación de defectos sobre la banda de rodadura.

Tipo de Defecto	Clasificación	Dimensión Crítica
Planos	Aislados	Mayores a 30 mm
	Múltiples	Mayores a 40 mm
Desgaste		Más de 0.7 mm
Grietas	Por efecto térmico debido al frenado	A partir de 40 mm
	Por fatiga de contacto de rodadura	A partir de 40 mm
	Por efecto térmico producido por patinada	No exceder los 40 mm
Cavidades		15 mm de longitud circunferencial

(Rail Safety and Standards Board Limited, 2007)

Según la Asociación Americana de Ferrocarriles (AAR), los defectos en las ruedas deben ser manejados según una tabla de códigos establecida en la Regla 41 de la norma titulada “*Field Manual of the AAR Interchange Rules*”. La tabla es la siguiente:

Tabla 5. Códigos de defectos según la AAR.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
03	Rueda en falla.
07	Material obsoleto.
08	Rueda incorrecta (rueda no estándar para el coche).
09	Reporte de reparaciones (usar solamente en tareas de mantenimiento)
11	Retirado por reparaciones asociadas pero en buenas condiciones.
23	Requisito reglamentario del Gobierno.
25	Cambio a solicitud del dueño, operario o técnico.
31	Defecto térmico según la regla 95.
60	Pérdida del espesor de la pestaña.
61	Rueda con fuerte golpe. Golpe entre los 80 y 90 kips detectado por el detector de alto impacto.
62	Pestaña vertical.
63	Superficie de rodadura con cavidades.
64	Pestaña con altura por encima de las tolerancias.
65	Rueda con fuerte golpe. Golpe por encima de los 90 kips detectado por el detector de alto impacto.
66	Pestaña con grietas o quebrada.
67	Rueda con pérdida de redondez, rueda ovalizada.
68	Llanta con grietas o quebrada.
69	Grietas térmicas en el velo.
71	Llanta fracturada.
72	Llanta con deformación elástica.
73	Llanta delgada.
74	Grietas térmicas.
75	Superficie de rodadura con escamaciones.
76	Superficies de rodadura con pérdida de material.
77	Superficie de rodadura con acanaladuras.
78	Superficie de rodadura con aplanamientos.
80	Raspadura, abolladura o ausencia de material en cualquier parte de la superficie de rodadura de más de 1/8 de pulgada de profundidad.
81	Separación de ruedas fuera de norma.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
83	Rueda con velo agrietado o quebrado.
84	Rueda con agujeros en el velo.
85	Rueda con juego entre esta y el eje.
89	Defectos bajo la superficie o internos.
90	Rueda retirada por defectos en la otra rueda del mismo eje
98	Rueda retirada porque no cumple con las tolerancias de perfilado.

(The Railway Educational Bureau, 2008)

3.4 FABRICACIÓN

Actualmente la demanda de ruedas en la industria ferroviaria, busca conseguir unas tolerancias lo más ajustadas como sea posible, así como alargar la vida útil de las ruedas y optimizar su diseño. Para satisfacer las necesidades de este mercado y ser a la vez capaces de producir ruedas reduciendo sus costos lo mayor posible, se requiere por una parte el uso de moderna maquinaria y por otro lado el uso de tecnologías de punta para la producción de ruedas.

Los trenes han incrementado su velocidad notablemente en los últimos años, por tal motivo, a la hora de diseñar ruedas ferroviarias se debe tener en cuenta el consumo de energía para así poder disminuirlo al máximo, y por otro lado poder reducir las vibraciones generadas, lo cual será traducido en un incremento de la comodidad del viaje. Para alcanzar estos resultados se debe reducir al máximo su peso y aumentar su resistencia mecánica y así hacerle frente a la serie de cargas que debe soportar la rueda.

3.4.1 Normas de fabricación.

Las ruedas ferroviarias son exportadas de acuerdo a las especificaciones y requerimientos del cliente, es por esto que en la siguiente tabla se pueden ver las diferentes normas y estándares internacionales para la fabricación y comercialización de este componente de la industria ferroviaria.

Tabla 6. Normas de fabricación.

ORGANIZACIÓN	NORMA	DESCRIPCIÓN
AAR: Asociación Americana de Ferrocarriles.	AAR M 107/208	Especificaciones para la fabricación de ruedas de acero por forja y fundición.
ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.	ASTM A504	Especificaciones para la fabricación de ruedas de acero por forja.
	ASTM A551	Especificaciones para la fabricación de llantas de acero para trenes y aplicaciones de alta velocidad.
	ASTM A551-81	
BN	BN 918277	
BSI: <i>British Standards Institution</i>	BS 5892 parte 4	Material rodante ferroviario. Especificaciones para la fabricación de llantas por forja y laminación.
	BS 5892, parte 3: 1992	Material rodante ferroviario. Especificaciones para centros de ruedas (cubo) por forja y laminación.
	BS24	Material rodante ferroviario.
	EN 13262	Aplicaciones ferroviarias. Conjunto ruedas-eje y bogíes. Ruedas. Requerimientos.
IRS: <i>Indian Railway Standard</i> . Estándar Ferroviario de la India.	IRS R 15-95	Especificaciones técnicas para la fabricación de material rodante ferroviario. Ruedas y ejes de vagones.
	IRS R 3403	
	IRS R 19-93, partes 1-5	
ISO	ISO 1005	Material rodante ferroviario.

ORGANIZACIÓN	NORMA	DESCRIPCIÓN
JAS: <i>Japanese Standards Association</i> . JIS: <i>Japanese Industrial Standards</i>	JIS E 5402	Material rodante ferroviario.
KRS: <i>South Korea Railroad Standard</i> . Estándar Ferroviario de Corea del Sur.	KRS 2242-2107	Especificaciones técnicas para la fabricación de ruedas sólidas.
M	M4T 2000	
MORM	MOR-M-2001-2	
AFNOR: Asociación Francesa De Normalización	NF EN 10228-3	Ensayos no destructivos para piezas de acero forjado. Parte 3: pruebas de ultrasonido para piezas de acero forjadas con contenido ferrítico o martensítico.
	NF F 01-111	
	NF F 01-115	Especificaciones técnicas del perfil de rueda ferroviaria
	NF F 01-131	
	NF F 01-33	
PN: <i>Polish Committee For Standardization</i>	PN-84	
	PN-84 H84027/06	
	PN91/K91032	
	PN-92	
	PN-92/K91018 pr	
RSP: <i>Rail Settlement Plan</i>	RSP #SM-55/2543	

ORGANIZACIÓN	NORMA	DESCRIPCIÓN
SNCB: <i>Société Nationale des Chemins de fer Belges</i> . Compañía Ferroviaria Nacional de Belgica.	SNCB A-12	
TJZL	TJZL 01-98	
	TJZL 02-99	
TTBS: <i>Trinidad And Tobago Bureau Of Standards</i>	TTS 094	
	TTS 248	
UIC: <i>International Union Of Railways</i>	UIC 810-1	Especificaciones técnicas para el suministro de llantas de acero.
	UIC 812-1	Especificaciones técnicas para el suministro de de ruedas y llantas forjadas.
	UIC 812-3	Especificaciones técnicas para el suministro de ruedas sólidas de acero.
UNI: Organización Italiana De Normalización	UNI 6102	Especificaciones para la fabricación de llantas ferroviarias.

(@KLW An Interpipe Brand, 2011)

3.4.2 Proceso de fabricación.

Independientemente de lo que se va a fabricar, la rueda enteriza o la llanta para la rueda, el proceso de fabricación es prácticamente el mismo.

La fabricación de ruedas se puede hacer mediante el proceso de forja o el proceso de fundición, pero cabe anotar que en Estados Unidos el proceso que más se utiliza es la fundición mientras que en Europa el proceso de fabricación más utilizado es la forja. Estudios realizados han demostrado la superioridad de las ruedas forjadas

puesto que este tipo de proceso hace que las propiedades de tenacidad del material aumenten. Por tal motivo es que las ruedas fabricadas mediante el proceso de forja son las más usadas en trenes de alta velocidad, ya que son las que mayor seguridad brindan.

Después de la primera fase de fabricación o del proceso de forja o fundición, que es donde se le da la forma inicial a la rueda, esta debe ser sometida a un tratamiento térmico de templado y revenido para dejar el velo y el cubo con sus propiedades finales del material. Este tratamiento térmico además de actuar sobre el velo y el cubo, permite aumentar la dureza de superficie de rodadura para eliminar esas tensiones internas residuales que deja el proceso de fabricación, pues con esto se evita la aparición y desarrollo de fisuras del material.

Tras el proceso de tratamiento térmico en varias fases, la llanta trabaja a compresión desde la superficie de rodadura, mientras que el velo se ha contraído más y produce tracción sobre la llanta (Molina Sánchez, 2006). De este modo las tensiones de compresión inducidas en la parte exterior de la llanta dificultan la creación y crecimiento de grietas de fatiga hasta una profundidad aproximada de 40mm, donde la fuerza de tracción del velo compensa la anterior.

Sin embargo, las solicitaciones bajo condiciones de carga, aceleración y frenado en servicio, pueden llegar a invertir esta situación, convirtiendo las fuerzas de compresión en otras de tracción (Gordon & Perlman, 2001), condición que facilita la producción de grietas.

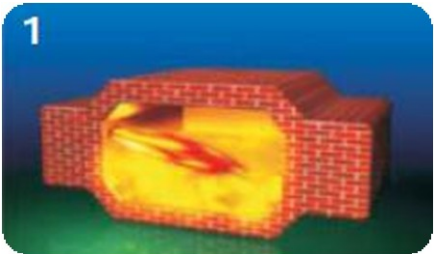
Por otra parte, con la serie de procesos de reperfilado y consiguiente reducción del diámetro de la rueda, la superficie de rodadura se aproxima a la región interna en la que las tensiones residuales son de tracción. Este hecho establece un límite a la cantidad de material que puede ser eliminada a lo largo de la vida útil de la rueda.

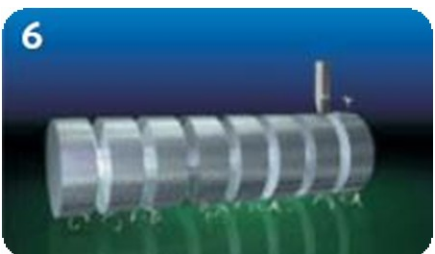
En cualquier caso, las ruedas recién fabricadas se someten a un proceso de inspección por ultrasonidos, para garantizar que están libres de defectos macroscópicos internos. En este proceso se evalúan las posibles indicaciones de

ecos que no deben superar el nivel de los producidos por taladros de fondo plano de 1, 2 o 3mm de diámetro, practicados a distintas profundidades en una rueda patrón, en función del nivel de exigencia requerido por la aplicación (por ejemplo, de nivel 1 para ruedas de alta velocidad) (ISO5948, 1994).

Independientemente de quien sea el fabricante de una rueda o llanta ferroviaria, el proceso de fabricación de estos dos componentes puede ser observado en las siguientes ilustraciones.

Ilustración 8. Proceso de fabricación de ruedas.

 1	Fundición del acero en el horno de hogar abierto para eliminar las impurezas del material y quemar el exceso de carbono.
 2	Distribución del acero fundido.
 3	Purificación del acero en el horno de arco eléctrico

	<p>Desgasificación del acero fundido.</p>
	<p>Horno para el vertido de las impurezas del acero.</p>
	<p>Corte del lingote en pequeños bloques o rebanadas.</p>
	<p>Inspección y reparación de las rebanadas de acero.</p>
	<p>Calentamiento de las rebanadas en el horno rotatorio.</p>

	<p>Remoción de la ceniza restante.</p>
	<p>Forja abierta con una prensa a 20 MN.</p>
	<p>Forja cerrada con una prensa a 50 MN</p>
	<p>Moldeado inicial de la rueda con una prensa a 100 MN.</p>
	<p>Laminación balanceada de la rueda.</p>

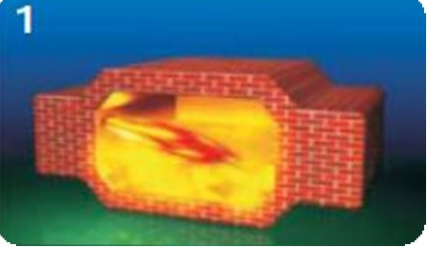
 <p>14</p>	<p>Calibración de la rueda con una prensa a 35/8 MN y perforación del agujero central.</p>
 <p>15</p>	<p>Refrigeración intermedia de las ruedas.</p>
 <p>16</p>	<p>Refrigeración de ruedas a temperatura ambiente o al aire libre.</p>
 <p>17</p>	<p>Mecanizado de la rueda.</p>
 <p>18</p>	<p>Calentamiento de la rueda en el horno rotatorio.</p>

<p>19</p> 	<p>Templado de la llanta de la rueda.</p>
<p>20</p> 	<p>Templado dentro de la fosa de los hornos.</p>
<p>21</p> 	<p>Refrigeración o enfriamiento controlado.</p>
<p>22</p> 	<p>Mecanizado CNC e inspección de balanceo.</p>
<p>23</p> 	<p>Control no destructivo automatizado (pruebas de ultrasonido, e inspección mediante partículas magnéticas).</p>

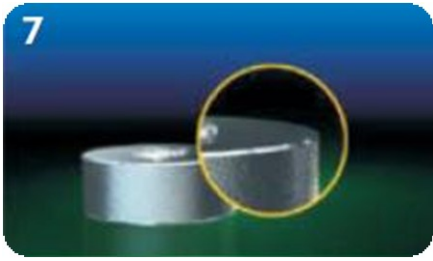
	<p>Medición e inspección de ruedas, prueba de dureza.</p>
	<p>Revisión de propiedades mecánicas y estructurales de la rueda.</p>
	<p>Almacenamiento.</p>

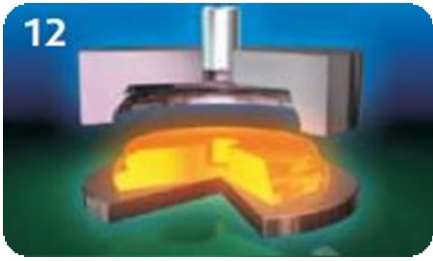
(@KWL An Interpipe Brand, 2011)

Ilustración 9. Proceso de fabricación de llantas.

	<p>Fundición del acero en el horno de hogar abierto para eliminar las impurezas del material y quemar el exceso de carbono.</p>
---	---

	<p>Distribución del acero fundido.</p>
	<p>Purificación del acero en el horno de arco eléctrico</p>
	<p>Desgasificación del acero fundido.</p>
	<p>Horno para el vertido de las impurezas del acero.</p>
	<p>Corte del lingote en pequeños bloques o rebanadas.</p>

	<p>Inspección y reparación de las rebanadas de acero.</p>
	<p>Calentamiento de las rebanadas en el horno rotatorio.</p>
	<p>Remoción de la ceniza restante.</p>
	<p>Forja abierta con una prensa a 20 MN.</p>
	<p>Medición del peso del bloque inicial en la báscula.</p>

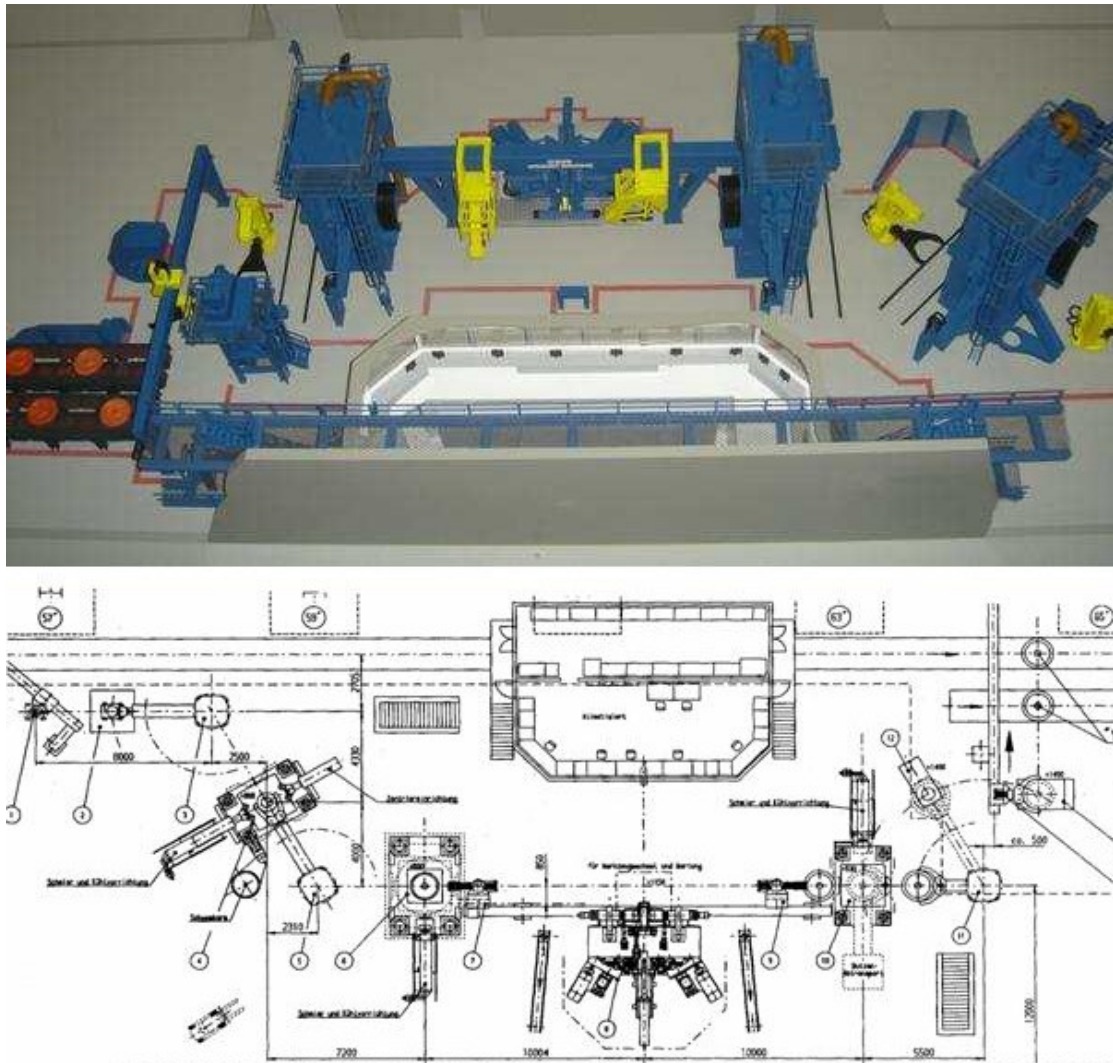
 <p>12</p>	<p>Forjado de la forma inicial y perforado.</p>
 <p>13</p>	<p>Perforación completa del agujero inicial.</p>
 <p>14</p>	<p>Laminación balanceada de la llanta.</p>
 <p>15</p>	<p>Marcación de la llanta.</p>
 <p>16</p>	<p>Pulido o perfeccionamiento en caliente.</p>

<p>17</p> 	<p>Tratamiento térmico.</p>
<p>18</p> 	<p>Control no destructivo (prueba de dureza y ultrasonido).</p>
<p>19</p> 	<p>Selección de muestras y realización de pruebas.</p>
<p>20</p> 	<p>Medición e inspección de llantas.</p>
<p>21</p> 	<p>Almacenamiento.</p>

(@KLW An Interpipe Brand, 2011)

Además de que el proceso de fabricación es prácticamente el mismo sin importar el fabricante, país o norma, una planta debe estar distribuida básicamente como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 10. Distribución general de una línea de producción.



(@ NTMK, 2006)

En la distribución de la línea de producción se pueden observar principalmente los siguientes componentes:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Manipulador de carga | 3. Manipulador de carga |
| 2. Limpieza | 4. Prensa de 50 MN |

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 5. Manipulador de carga | 10. Prensa de 50 MN |
| 6. Prensa de 90 MN | 11. Manipulador de carga |
| 7. Manipulador de carga | 12. Prensa de marcado |
| 8. Máquina conformado | 13. Máquina medida |
| 9. Manipulador de carga | 14. Manipulador de descarga |

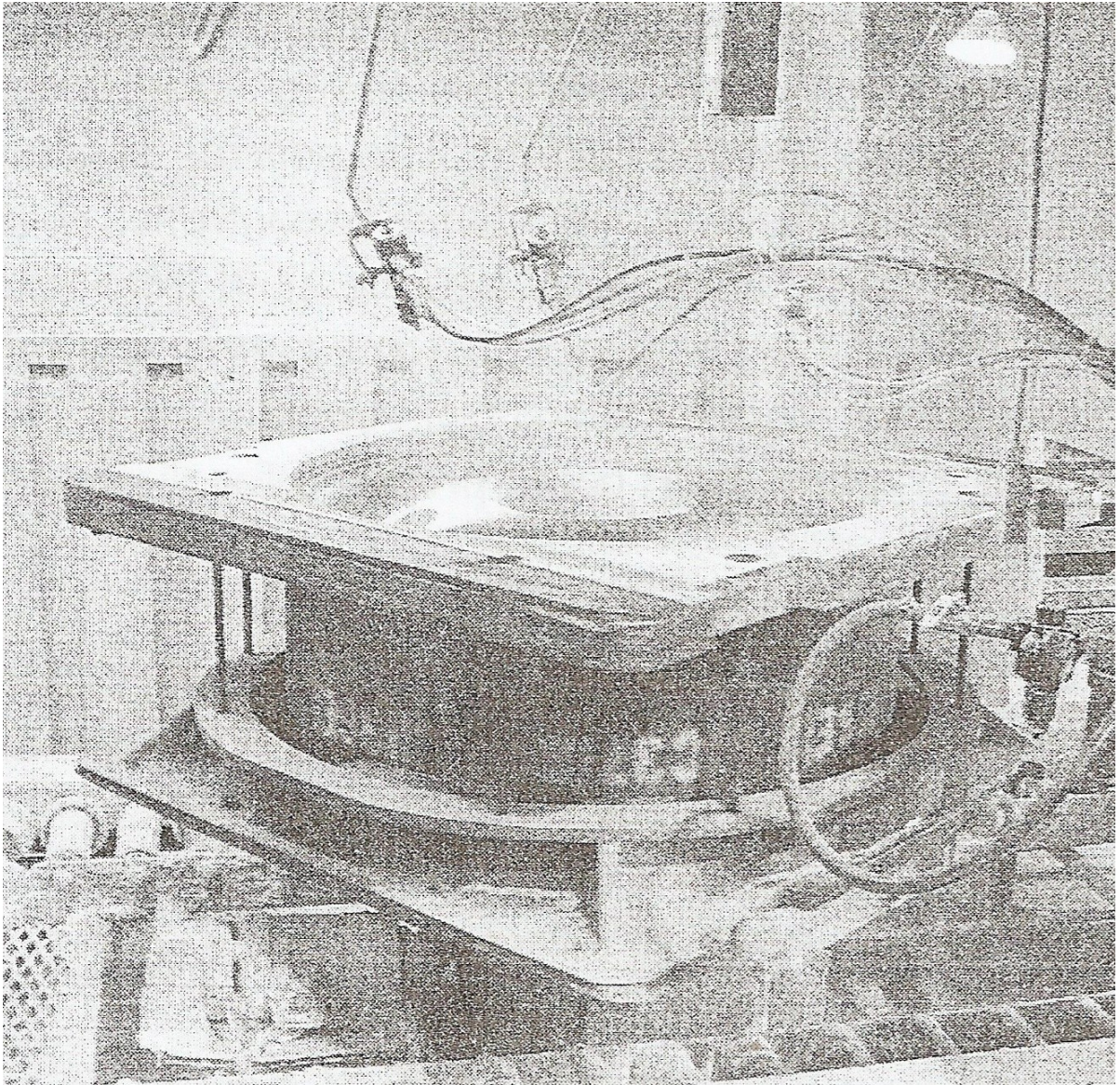
- Proceso de fabricación por fundición.

Los procesos de fundición utilizados por los diferentes fabricantes de ruedas difieren en muchos detalles. Pero todos se han desarrollado para producir ruedas, cumpliendo con los requerimientos y especificaciones exigidas por la AAR. Las ruedas por fundición son fabricadas con diferentes diámetros y espesor de llanta, y son clasificadas según la AAR.

Algunos fabricantes utilizan hornos eléctricos para la fundición de acero para la producción de ruedas. Recorte o trozos de acero, junto con algunos elementos tales como carbón, son necesarios para producir el acero con su composición requerida para el proceso de fundición. Ya teniendo el acero fundido, este se vierte en un molde que posee la forma inicial de la rueda. En este proceso se evidencia las prácticas de cada uno de los fabricantes.

Un ejemplo de este proceso es usar un molde de grafito y una técnica de enfriamiento llamada lluvia a presión. El molde se compone de 2 bloques de grafito mecanizados y de alta precisión para dar forma a la rueda. En este proceso, la parte inferior del molde posee un agujero en el centro a través del cual el acero fundido es forzado durante la colada del material. La parte superior del molde posee aberturas recubiertas de arena cerca de la llanta para alimentar la entrada de acero en la superficie de rodadura durante la solidificación, generando el particular sonido del proceso de fundición. La colada del material es realizada con aire a presión, controlada automáticamente para mantener el flujo estable o regular del metal dentro del molde. Cuando se llena, un tapón o taco es obligado a asentarse en el fondo, lo cual frena el ingreso del metal desde atrás del drenaje. La siguiente ilustración muestra un molde de grafito siendo preparado para el proceso.

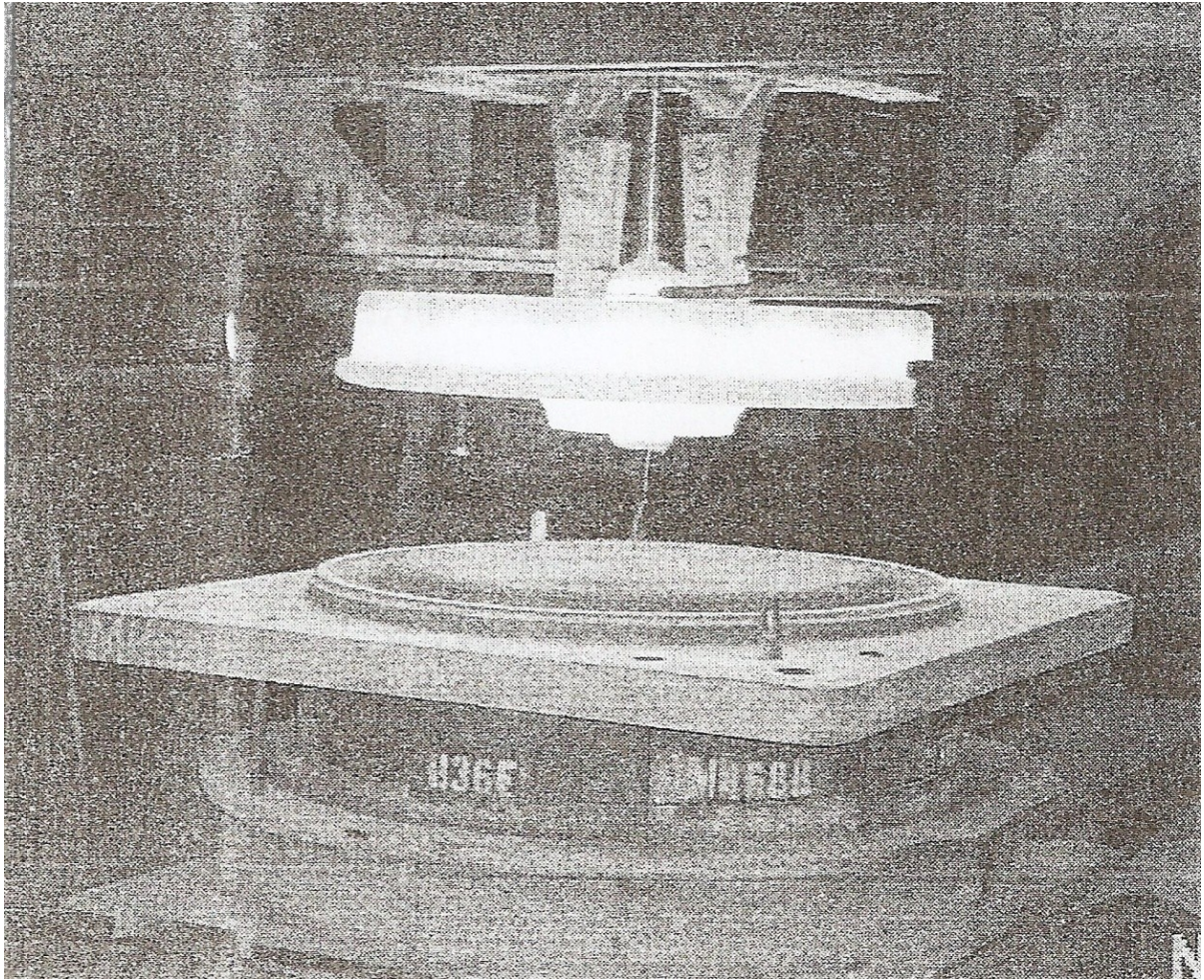
Ilustración 11. Molde de grafito para la fabricación de ruedas.



(The Railway Educational Bureau, 2008)

Las ruedas por fundición se pueden enfriar en el molde para completar el proceso de solidificación, lo cual varía enormemente dependiendo del material del molde. En la siguiente ilustración se puede observar como las ruedas son retiradas del molde y enfriadas controladamente antes o después de que el centro del cubo es removido para formar un agujero duro.

Ilustración 12. Rueda removida del molde.



(The Railway Educational Bureau, 2008)

Todas las ruedas son sometidas a un tratamiento térmico para producir cambios metalúrgicos deseados en el material lo cual proporciona a la rueda una distribución favorable del estrés residual. Las ruedas fundidas a las cuales no se les realiza un tratamiento térmico especial en la superficie de rodadura son denominadas según la AAR como ruedas clase U. Dicha clase de ruedas ya no son producidas.

Donde continuamente se utilizan los hornos para realizar el tratamiento térmico se evidencia la relación existente con las ruedas clase L, A, B, y C. La medición de la dureza Brinnell, es una técnica donde la fuerza se mide al forzar el paso de una bola de acero por el material a estudiar, dicho test se le realiza al 10% de cada lote de ruedas. Cuando los hornos son usados para realizar tratamiento térmico

dependiendo del tipo de lote, la medición de dureza de Brinnell tiene que ser realizada al 10% de las ruedas de cada lote de tratamiento térmico, siempre que al menos una rueda es seleccionada como muestra de cada uno de los lotes de tratamiento térmico.

Las ruedas terminadas son limpiadas mediante *shot-blast*, técnica mediante la cual se dispara a presión un material abrasivo, antes de la inspección final. Las ruedas son enviadas dependiendo del proceso de la superficie de rodadura.

Si las ruedas pasan el control de calidad y cumplen con todas las normas de fabricación, entonces estas son medidas y marcadas. Antes de ser enviadas las ruedas al consumidor, estas deben ser agrupadas por parejas que tengan la misma medida.

- Proceso de fabricación por forja.

Este tipo de ruedas son fabricadas mediante sucesivos procesos de forja o deformación del material dada la aplicación de fuerzas de compresión sobre los bloques de acero caliente. Los actuales procesos de fabricación pueden variar dependiendo del fabricante y los métodos empleados. La siguiente descripción muestra el proceso realizado por un fabricante.

El acero entra en la cadena de fabricación como un lingote cilíndrico. Grandes cierras cortan el lingote en bloques con un peso relativamente preciso de acuerdo a los diferentes diseños o tipos de ruedas. Por ejemplo, el bloque para la fabricación de una rueda H36 para tren de carga debe pesar aproximadamente 440 kg (970 lb), \pm 4,5 kg (10 lb). (La precisión en este sistema se demuestra por el hecho de que, antes de esto, la misma rueda fue cortada en un lingote pesando aproximadamente 463 kg (1020 lb), \pm 14 kg (30 lb).)

Después de cortar y pesar, los bloques son segregados y cargados dentro de un horno rotatorio. Este horno posee 5 zonas de calor. Un bloque entra en el horno que posee una temperatura inicial de 871°C (1600°F) y es llevada hasta 1260°C (2300°F) aproximadamente, por su paso a través de las 5 zonas del horno.

Luego, los bloques son puestos sobre la unidad de descalcificación. Esta unidad remueve el exceso de óxido de hierro antes de que el proceso de forja comience. Los bloques son limpiados dentro de la descalcificadora y son atacados con agua a alta presión. Este proceso es realizado para prevenir que se produzca oxidación en la superficie de rodadura.

Una prensa de forja es usada para dar forma inicial al bloque. Mientras el bloque está dentro de la prensa este comienza a tomar la verdadera forma de la rueda. Este proceso consiste en dar primero forma a la parte superior de la rueda y luego a la parte inferior. Luego de darle la forma inicial la rueda pasa al proceso de laminado.

El proceso de laminado es controlado por computadora, esta máquina posee unos rodillos que permiten que la rueda gire durante el laminado, lo cual permite el contacto con el velo para darle su forma. Otras partes de la máquina como los rodillos, herramientas, rodillos de posicionamiento, rodillos cónicos, y guías, proporcionan las fuerzas para darle forma a la rueda.

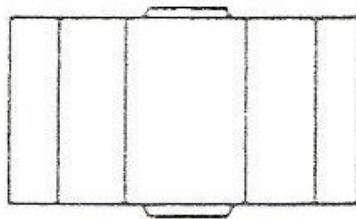
Cuando las dimensiones de la rueda alcanzan los valores específicos para el diseño, la laminación automáticamente se detiene. Los rodillos de posicionamiento y centrado aseguran la uniformidad y concentricidad de la rueda con la pestaña requerida. El tiempo total estimado para la laminación de una rueda es de 1 minuto.

Después del proceso de laminado, la rueda entra en una prensa de velo y cubo. Esta tiene dos subprocesos los cuales forjan la forma final de la rueda. Primero la rueda es presionada para darle la forma de “S” al velo. Luego la rueda es taladrada para producir el agujero del centro para poder ser montada sobre el eje.

Finalmente, la rueda es sellada e inspeccionada. Una máquina de marcación automática graba la información de fabricación en el cubo de la rueda. La inspección final, es manual o automática, lo cual garantiza el control de calidad de las ruedas.

La siguiente ilustración muestra como es el proceso para dar forma a una rueda por forja.

Ilustración 13. Pasos de la fabricación por forja.



1. Bloque de acero



2. Forja en caliente



3. Forja en frío



4. Laminado



5. Prensado de Velo y Cubo

(The Railway Educational Bureau, 2008)

- Tratamiento térmico.

El tratamiento térmico de templado al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el formado inicial de la rueda. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada durante 345 segundos. Como la primera temperatura está por encima de la temperatura de transformación de fase, se produce la transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. La microestructura perlítica es la que da a la llanta su alta dureza.

En este punto la llanta se ha enfriado y se expande, mientras que el velo y el cubo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480°C durante 2 horas para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este periodo el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno induce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante 6 horas aproximadamente. (Gordon J. E., 1995)

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de grietas, reduciendo el riesgo de falla en servicio. El campo de tensiones residuales a compresión se crea hasta una profundidad de alrededor de 40 mm desde la banda de rodadura. A medida que la rueda se desgasta y es reperfilada, la capa de tensiones a compresión desaparece y la superficie de rodadura se acerca a la capa de tensiones a tracción. (Gordon & Perlman, 2001)

- Control de calidad.

Para asegurar que no se producen defectos macroscópicos en las ruedas tras su fabricación, a petición de las empresas de fabricantes y de mantenimiento de los

trenes, todas las ruedas deben ser inspeccionadas por el proveedor mediante la técnica de ultrasonido, siendo el tamaño mínimo de defecto permitido de 1, 2 ó 3 mm, es decir, reflexión igual a la de un agujero de fondo plano de diámetro 1, 2 ó 3 mm.

Por ejemplo K LW está certificado para la fabricación de ruedas y llantas ferroviarias por las siguientes compañías:

- AAR: Association of American Railroads.
- Die Bahn: Deutsche Bahn AG.
- VUZ: Vyzkumny Ustav Zeleznicni (Railway Research Institute).
- RISAS: Railway Industry Supplier Approval Scheme.
- ISO: Quality certificate ISO 9001:2008.
- Serbian Railways.
- UTK: Urzędu Transportu Kolejowego (Polonia).
- ZSSK CARGO: PKP CARGO (Polonia)

3.5 MANTENIMIENTO

Las ruedas y los ejes eran vulnerables a las fracturas, especialmente en el inicio del ferrocarril cuando las técnicas de fabricación no eran tan sofisticadas como hoy, y eran inspeccionados diariamente para detectar signos de daño o fatiga. Muchas compañías de ferrocarriles pintaban una marca blanca sobre la llanta de la rueda y el cubo de modo que cualquier movimiento de la rueda en el cubo era inmediatamente perceptible. Las ruedas también eran golpeadas suavemente con un martillo para asegurar que un "ring" o sonido fuera escuchado con el fin de confirmar que no había grietas. A pesar de estos controles, ocurrían en ocasiones accidentes debido a la fractura o fatiga de las ruedas o ejes durante su servicio.

Para la década de 1930, se ha desarrollaron técnicas para poner a prueba o revisar el estado del eje por medios eléctricos. Control por partículas magnéticas es uno de los sistemas usados, donde las partículas energizadas del acero eran aplicadas a los ejes para determinar la ubicación de las grietas. En la década de 1950, aparece la utilización de las pruebas de ultrasonido. Hoy en día, estos sistemas son estándar. Este tipo de detección de averías o grietas es llevado a cabo para todos los sistemas de material rodante, incluidas las locomotoras, coches y vagones. (@Railway Technical Web Pages, 1998 - 2011)

3.5.1 Importancia del Mantenimiento.

Además de mejorar los niveles de seguridad y confort, el mantenimiento preventivo de las ruedas tiene importantes efectos económicos. Así, el mayor costo de mantenimiento de las empresas ferroviarias se atribuye a la corrección de daños causados en la infraestructura por defectos superficiales en las ruedas (Nicks, 1998). Por otra parte se ha estimado que el mantenimiento de las ruedas representa hasta el 30% de los costes asociados a la conservación de los vehículos, siendo la mayor parte atribuida al reperfilado (Cassidy, 2000).

En un análisis realizado por la Asociación Americana de Ferrocarriles (AAR), se pone de manifiesto un incremento en el volumen de ruedas retiradas a partir del año 2000 por causas de *alto impacto*, correspondiente al código 65 (Tabla 5. Códigos de defectos según la AAR) de su clasificación, en relación a otras causas (ruedas falladas, desgaste y administrativas). Esto es explicable, por una parte, debido a la mejora de los procesos de fabricación de ruedas, que tiende a reducir las incidencias por estas últimas causas. Por la otra, el incremento de las solicitudes mecánicas (velocidades, aceleraciones y cargas por eje) hace que aumenten las ruedas retiradas por efectos de la fatiga mecánica del material.

Cuando se producen defectos importantes en la banda de rodadura (planos, exfoliaciones, cavidades, etc.), el costo asociado al reperfilado de la rueda en las primeras etapas de formación de los defectos puede ser inferior al de un mantenimiento tardío en el que estos han progresado y pueden requerir la retirada

total de la rueda. Así, un factor importante para reducir costos de mantenimiento, es la detección temprana de los posibles defectos, su evaluación en cuanto a características críticas de seguridad y/o agresividad y su eliminación mediante una operación de reperfilado.

Además de estos costos directos, han de considerarse otros que se derivan de aplicar normativas de limitación de ruido, sobre todo en zonas pobladas. Estudios realizados en diversos países de la Unión Europea muestran que la principal fuente de ruido en vehículos ferroviarios se debe a los efectos de rodadura (@ IMAGINE). Las irregularidades en la superficie de rodadura generan ruido por impacto, con componentes de frecuencia desde las decenas de hertzios (planos aislados) hasta los 4KHz por vibración en ruedas a alta velocidad (Mellet, Létourneaux, & Poisson, 2006) (Thompson & Jones, 2000).

3.5.2 Mantenimiento a nivel mundial.

Hasta la aparición de sistemas automáticos de inspección de ruedas, cuyo coste de operación puede considerarse prácticamente nulo excluyendo la inversión en los equipos, las ruedas y ejes de los trenes han sido inspeccionados con técnicas manuales a intervalos regulares. Estos intervalos se establecen en función de las condiciones en que opera el sistema ferroviario: velocidad de la línea, construcción de las vías, peso por eje y condiciones climáticas (Cannon, Edel, Grassie, & Sawley, 2003). Por tal motivo, cada país se encarga de definir sus propias normas y periodos de inspección.

Así, en Japón, se realizan inspecciones de ruedas y ejes cada 30,000Km (ó 30 días) en los trenes de alta velocidad, mientras que los bogíes se inspeccionan a intervalos de 450,000Km (ó 1 año) (Ishizuka, 1999).

En el Reino Unido las inspecciones se realizan, generalmente por ultrasonidos, cada 240,000Km (ó 200 días), (Zerbst, Mädler, & Hintze, 2005).

En Alemania y España las ruedas de los trenes de alta velocidad (ICE y AVE, respectivamente) se inspeccionan a intervalos regulares de 250,000Km (Kappes, Kröning, Rockstroh, Salzburger, & Walte, 2000), (Álvarez Rodríguez, 2010).

En Italia, la red de alta velocidad TAV inspecciona sus ruedas cada 200,000Km, inmediatamente después del reperfilado (Molina Sánchez, 2006).

En Chile, la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE) constantemente inspecciona su equipo rodante en diferentes estaciones, y así poder tomar las decisiones de reperfilado de ruedas, haciendo de estas tareas una acción correctiva.

Finalmente, se puede observar que la frecuencia con la que se realizan estas inspecciones en los diversos países, parece buscar un equilibrio entre los costos de la inspección y los que se derivan de la presencia de defectos en las ruedas, aunque siempre manteniendo un elevado nivel de seguridad

3.5.3 Inspección de ruedas.

Con el tiempo las ruedas tienden a desgastarse. Es normal y lógico que este desgaste con el tiempo genere o traiga nuevos problemas en la rueda e incluso en el tren. Cuando el desgaste es lo suficientemente grave, las ruedas deben considerarse defectuosas y se deben tomar acciones correctivas. Algunas ruedas se pueden llevar a su estado inicial mediante el reperfilado mientras que otras deben ser retiradas puesto que no pueden ser reperfiladas. Las condiciones que causan tales defectos son particularmente numerosas como los defectos mismos. Según la AAR, cuando un defecto ocurre, la rueda debe ser reperfilada o retirada por completo de servicio.

La AAR ha fijado estándares para límites de desgaste e indicaciones para realizar inspecciones y determinar cuándo una rueda debe ser retirada antes de que una falla en servicio ocurra. Estas reglas pueden ser encontradas en la norma 41 del manual *“Field Manual of the AAR Interchange Rules”*.

Algunos defectos son más fáciles de detectar mientras un tren en movimiento se encuentra próximo a entrar a los talleres o estaciones. El deslizamiento o ruedas

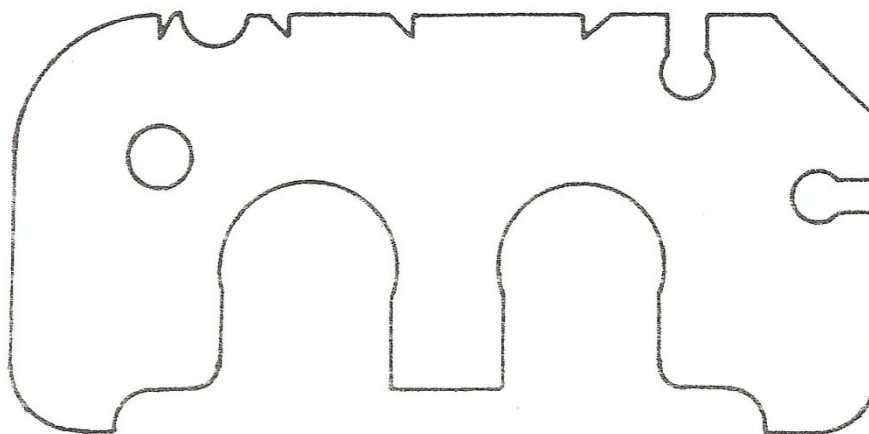
fuera de medida usualmente pueden ser localizados al mismo tiempo por su sonido. Por otra parte, un eje doblado puede ser detectado por el pequeño “brinquito” producido. Los defectos sobre la superficie de rodadura son más evidentes cuando la rueda está girando. Vagones con defectos detectados en movimiento, pueden ser observados fácilmente durante una inspección con el vagón estacionario.

Los vagones o trenes con ruedas defectuosas deben ser identificados y reportados para una mejor inspección y reparación. En algunos casos la rueda puede ser reparada o reperfilada por acciones preventivas, mientras que en otros debe ser reparada inmediatamente, es decir, el reperfilado debe ser una acción correctiva.

- Instrumentos o galgas de inspección.

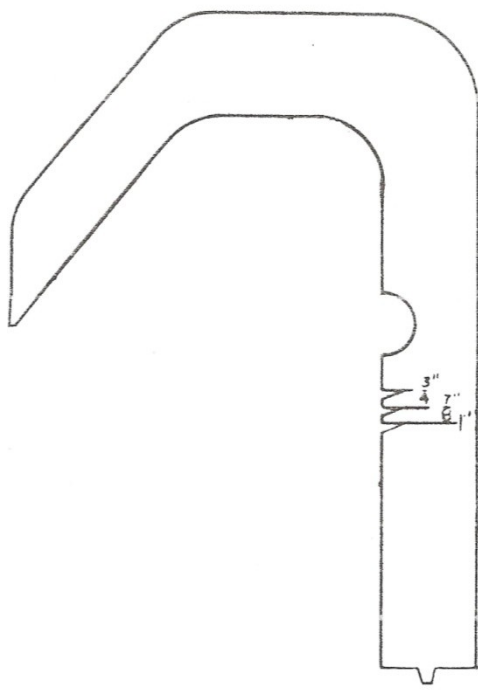
Existen numerosas galgas o plantillas que deben ser utilizadas para medir que tan grande o grave es el defecto que presenta una rueda. Cada uno de estos instrumentos puede ser usado para detectar más de un problema. Es importante recordar que la inspección visual de ruedas es realizada sin estos elementos ya a que hay defectos para los cuales aun no se han inventado instrumentos que permitan medirlo. La inspección de ruedas se puede realizar con alguno de los siguientes instrumentos:

Ilustración 14. Galga para la medición de defectos en la pestaña y superficies planas en la superficie de rodadura.



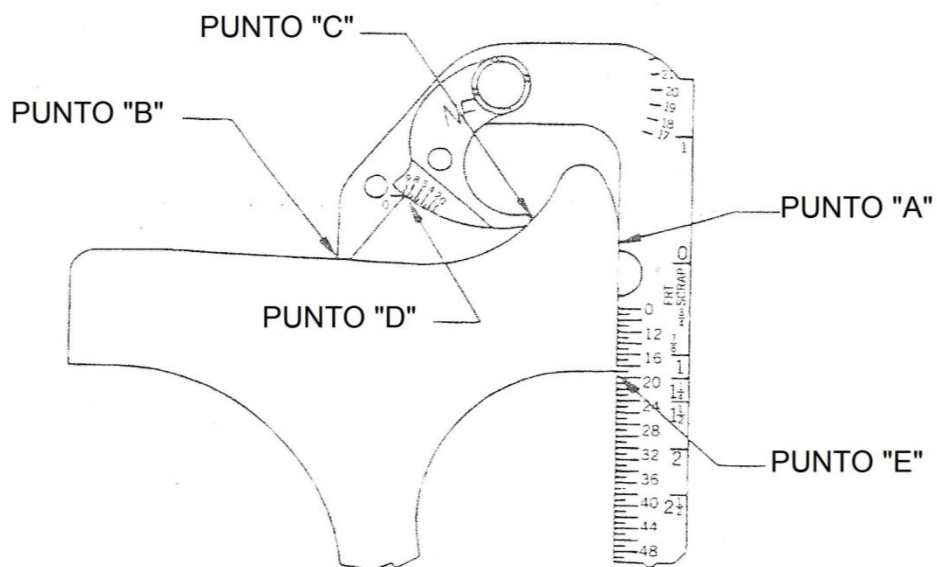
(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 15. Galga simple para medir la altura de la pestaña, espesor de la llanta y profundidad de defectos en la superficie de rodadura.



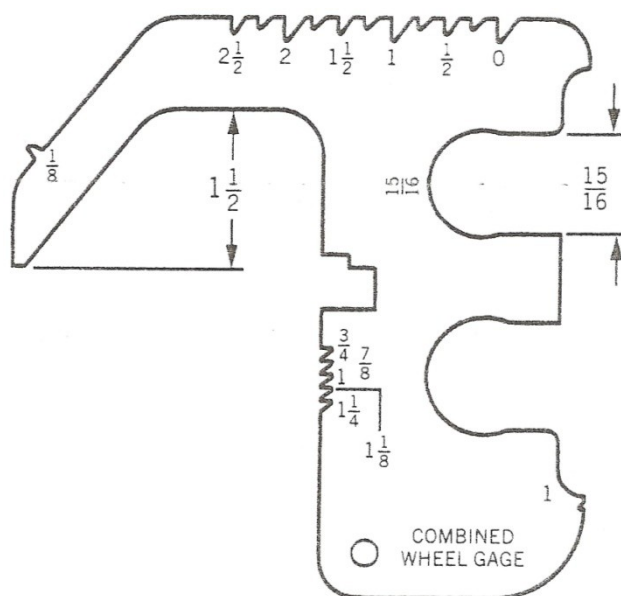
(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 16. Calibrador análogo graduable para medir el espesor de llanta o *rim thickness*.



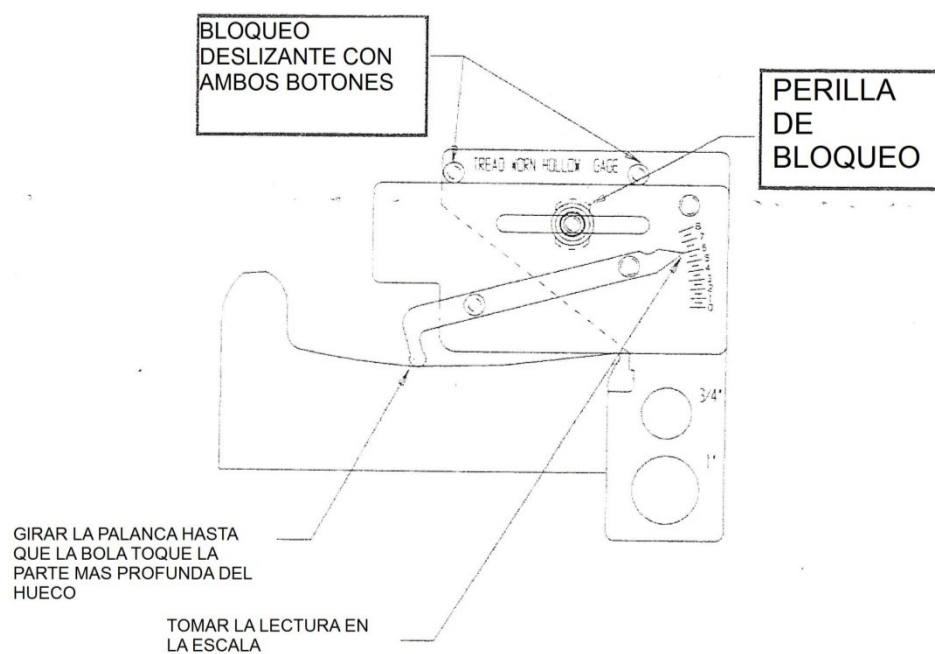
(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 17. Galga combinada para medir todos los parámetros de la pestaña, espesor de llanta y defectos en la superficie de rodadura.



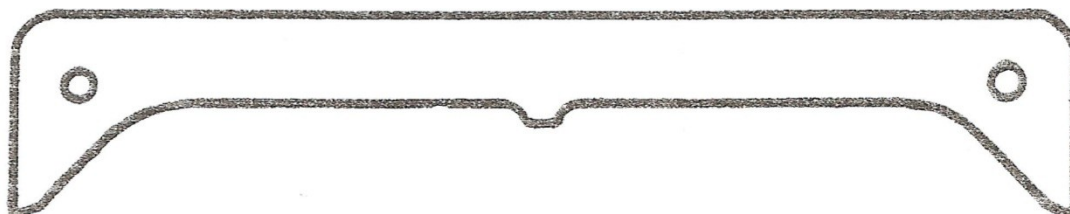
(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 18. Calibrador análogo graduable para la medición de la profundidad de defectos en la superficie de rodadura.



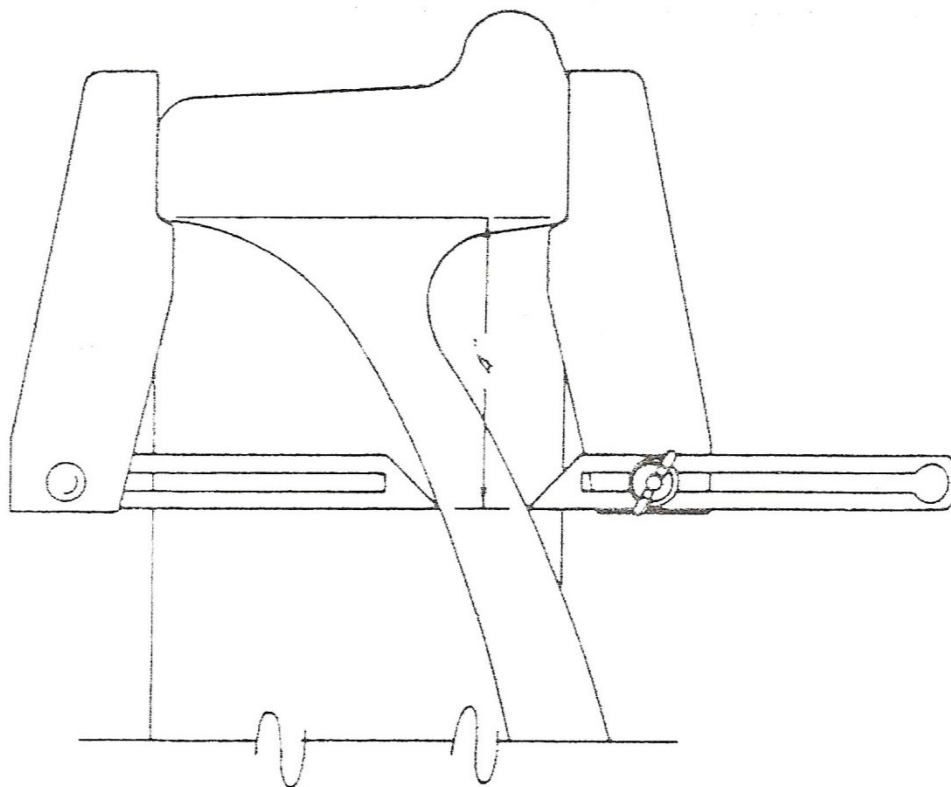
(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 19. Galga para medir la ovalización o pérdida de redondez de la rueda.



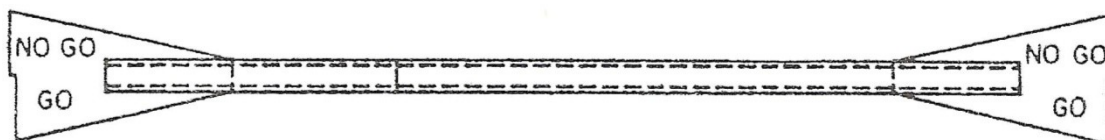
(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 20. Galga para medir el sobrecalentamiento de la rueda.



(The Railway Educational Bureau, 2008)

Ilustración 21. Galga para medir la separación entre las caras internas de las ruedas.



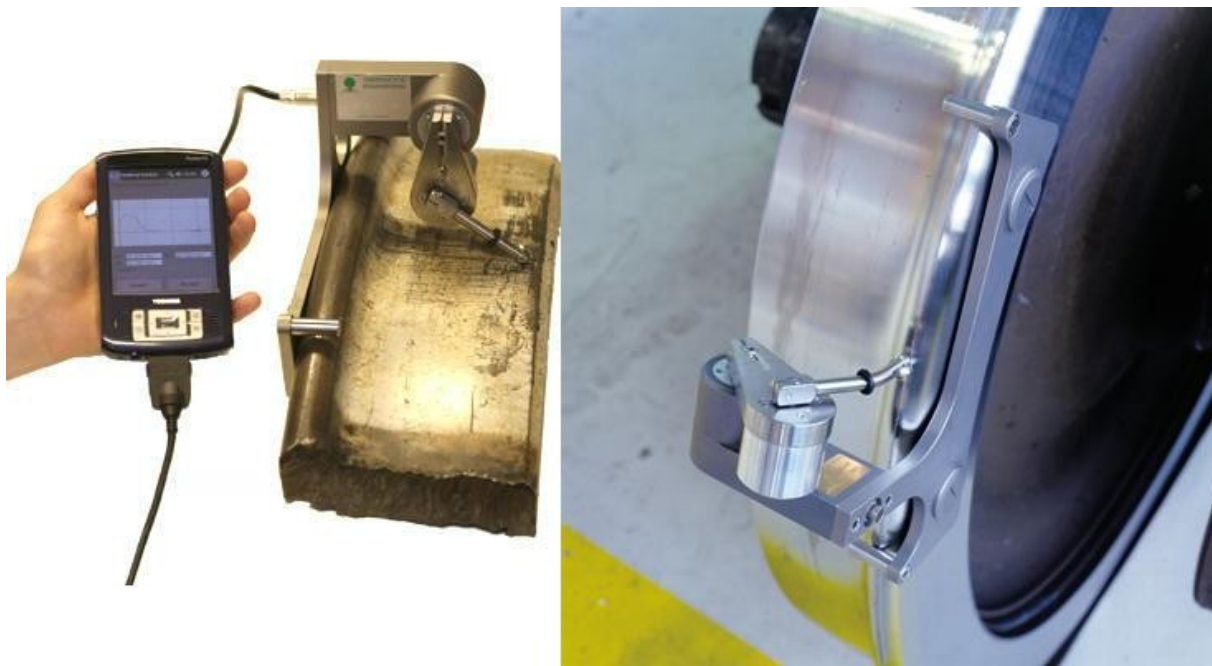
(The Railway Educational Bureau, 2008)

La AAR establece y recomienda que los calibres e instrumentos deban ser usados en la inspección de ruedas. Estos instrumentos deben a su vez ser inspeccionados y verificados periódicamente con respecto a otros que sirvan de referencia, los cuales no pueden ser usados como instrumentos de medida, sino como instrumentos de calibración de sus similares, lo cual evita que se pierda el patrón de medida.

Los instrumentos de inspección mostrados en las ilustraciones anteriores deben ser usados únicamente si los vagones o trenes se encuentran estacionados y desenergizados.

Además de los elementos mencionados anteriormente, existen otros instrumentos o equipos que permiten monitorear las ruedas o ver el estado de estas y su perfil. El *miniprof* es uno de esos instrumentos que ayuda a mejorar las tareas de inspección pues es portable y fácil de manejar y que permite medir y controlar el perfil de una rueda de una manera conveniente.

Ilustración 22. *Miniprof*, instrumento para realizar la medición digital del perfil de una rueda.



(@ ECS Esveld Consulting Services BV, 2011)

- Equipos para el monitoreo de ruedas.

A medida que avanzan las tecnologías, avanzan las herramientas para la solución de diferentes problemas e industrias. Por eso en la actualidad, la industria ferroviaria aumenta su capacidad tecnológica y con ella un sin número de aplicaciones y herramientas.

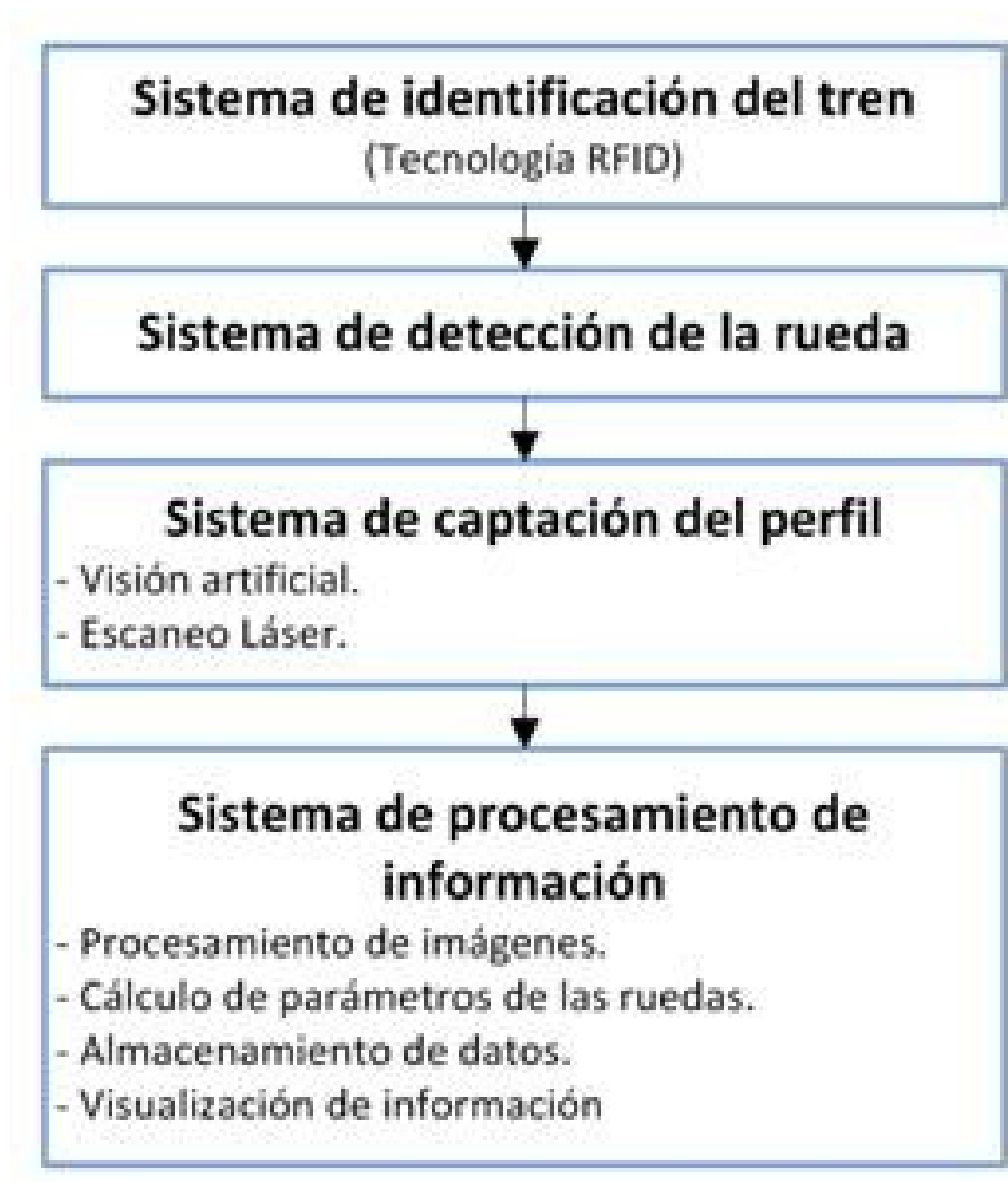
La muestra del avance tecnológico en la industria ferroviaria se puede evidenciar entre muchas, el monitoreo a las ruedas. Esto se da gracias a la tecnología de visión artificial o escaneo laser, la cual permite la captación del perfil de la rueda.

Este modo de captación de parámetros elimina al máximo el error humano, ya que se estandariza la toma de medidas dado que es un sistema automatizado. Estos sistemas basados en visión artificial o escaneo laser son ubicados en pista, lo cual permite monitorear las ruedas con el tren a marcha lenta, caso contrario con las galgas o calibres fijos y con el *miniprof* que debe estar estacionado y desenergizado el tren, además de que se disminuyen los tiempos de intervención.

Los equipos de monitoreo poseen 4 subsistemas principales, y los cuales deben cumplir con ciertas tareas. El subsistema que se encarga de la identificación del tren monitoreado o medido posee la tecnología identificación por radiofrecuencia (RFID). Después de reconocer el tren que está siendo medido, aparece en acción el sistema de detección de la rueda, que como su nombre lo indica, se encarga de detectar la rueda cuando esta se encuentra ubicada para ser medida. Luego de la detección se procede a captar el perfil de la rueda, sea mediante visión artificial o escaneo laser. Y para finalizar actúa el sistema de procesamiento de información, es decir, se procesa la imagen, se calculan los parámetros de las ruedas, se almacenan los datos y se visualiza la información.

El sistema de monitoreo automatizado de ruedas se puede resumir según el siguiente proceso.

Ilustración 23. Subsistemas del proceso de monitoreo de ruedas.

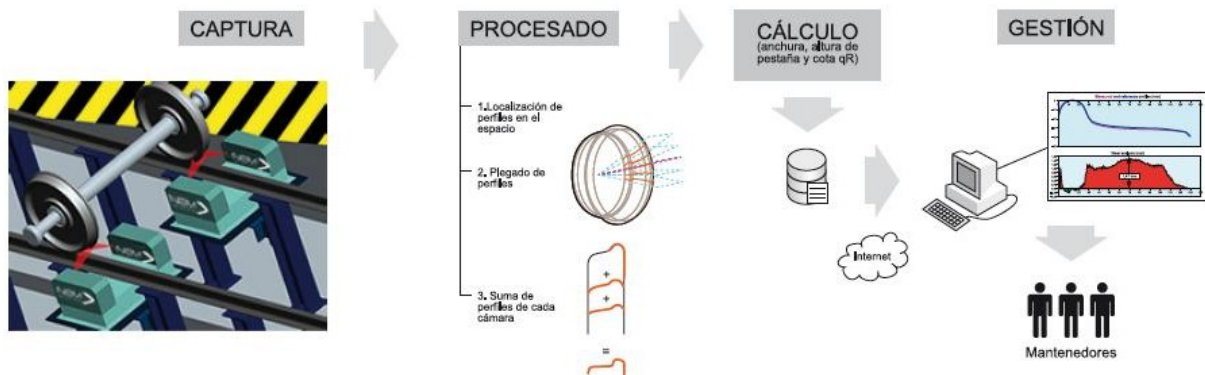


(GEMI, Universidad EAFIT, 2011)

Estos sistemas o equipos para el monitoreo de ruedas están en la capacidad de realizar mediciones de los parámetros de la rueda tales como el espesor de la pestaña (S_d), altura de la pestaña (S_h), escarpadura de la pestaña (Q_r), diámetro de la rueda y la distancia entre caras internas de las ruedas del mismo eje.

En la siguiente ilustración se pueden observar las principales acciones que realizan los sistemas de monitoreo de ruedas.

Ilustración 24. Proceso del sistema SCLAR, NEM Solutions.



(@ NEM Solutions, 2011)

En general estos sistemas tienen grandes ventajas y características tales como:

- Captación y medición automática con el tren en movimiento.
- No requiere obra civil ni mantenimiento continuo.
- Independiente de la presencia de areneros.
- Evita el efecto de muescas, poros e imperfecciones.
- Sistema calibrable mediante patrón portátil con trazabilidad ENAC.
- Identificación de ruedas vía tecnología RFID.
- Precisión de trabajo: Qr, Sd y Sh de la pestaña: $\pm 0.1\text{mm}$.
- Gestión y almacenamiento automático de medidas y perfiles.
- Acceso privado e inmediato a la información vía Internet.
- Evaluación del desplazamiento y desgaste de material producido.
- Ahorro de tiempo y recursos en la realización de medidas.
- Mayor disponibilidad de trenes en taller.
- Estandarización del input de medida. Eliminación del error humano.
- Reducción de costos de compra y puesta en marcha.
- No posee partes móviles por lo que su mantenimiento es sencillo.

Ilustración 25. Sistema SCLAR, NEM Solutions. Sistema de captura de perfil con visión artificial



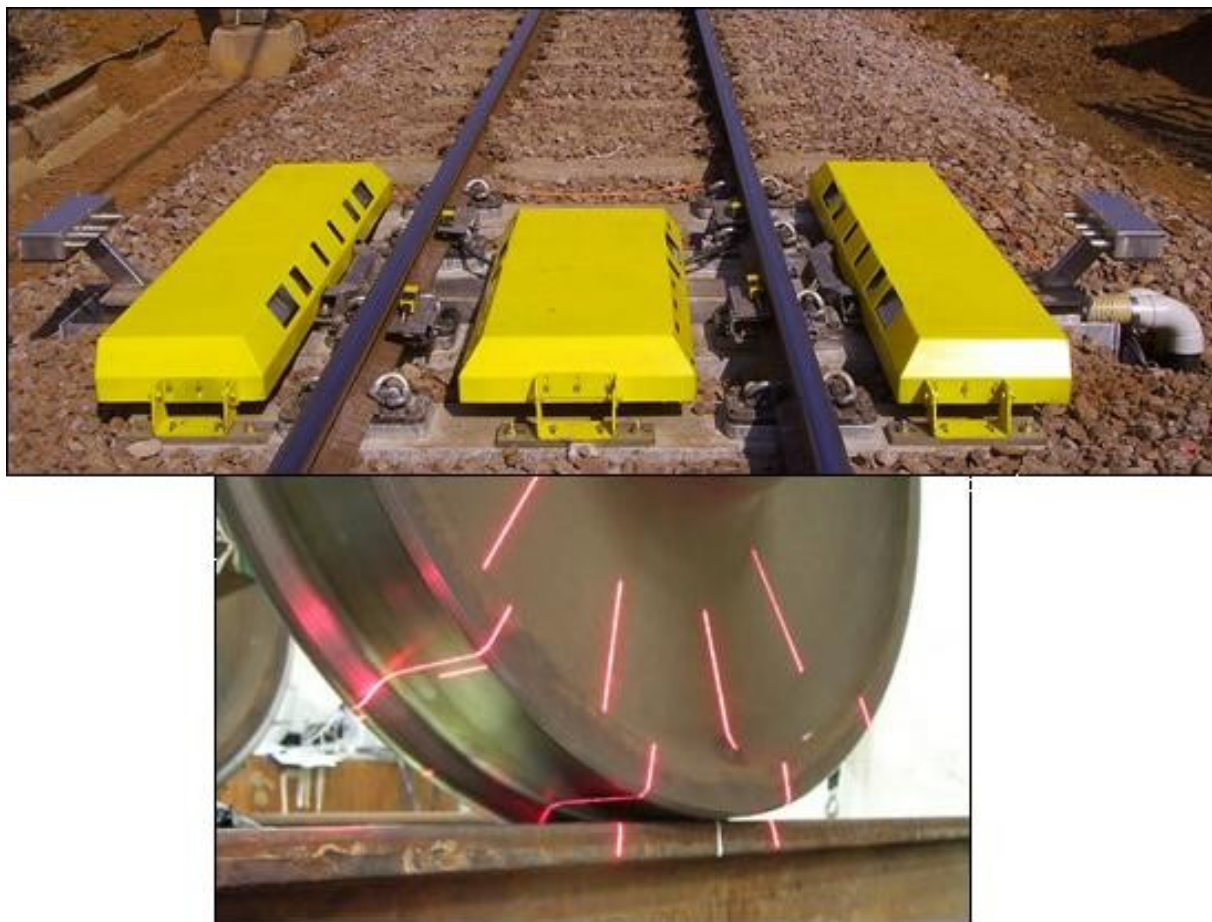
(@ NEM Solutions, 2011)

Ilustración 26. Sistema PZK, Koltech. Sistema de captura del perfil de rueda con escaneo laser.



(@ KOLTECH, 2011)

Ilustración 27. Sistema MRX, MRX Technologies. Sistema de captura de perfil con escaneo laser.



(@ MRX TECHNOLOGIES, 2011)

Las 3 ilustraciones son los sistemas de monitoreo de 3 fabricantes diferentes aunque existen otros fabricantes como:

- Dr. Wehrhahn, Alemania.
- DANO RAIL, España.
- Beena Vision, USA.
- MerMec, Italia.
- Entre otros.

3.5.4 Reperfilado de ruedas.

El proceso de reperfilado es realizado para darle a la rueda las condiciones iniciales de diseño y poder alargar la vida útil de la rueda. Este proceso de reperfilado se realiza en el torno que está ubicado bajo vía en un taller. Este torno permite que las ruedas puedan ser reperfiladas aun estando montadas en el tren, a su vez reperfila al mismo tiempo las ruedas que están montadas sobre un mismo eje. Este torno evita que el mantenimiento de ruedas sea costoso y que el tren salga de servicio durante mucho tiempo. En la siguiente ilustración se puede observar un torno para reperfilear ruedas ferroviarias.

Ilustración 28. Torno para reperfilado de ruedas.



(@Railway Technical Web Pages, 1998 - 2011)

4. METRO DE MEDELLÍN

El Metro es empresa líder a nivel mundial en la utilización de tecnologías por cable aéreo para el transporte público, modelo en desarrollo social y transformación de las comunidades bajo su influencia y única empresa colombiana que ofrece desarrollos en el campo ferroviario. (@ Metro de Medellín, 2011)

El Metro es el Sistema de Transporte Masivo de gran capacidad que atraviesa el Área Metropolitana de Medellín de sur a norte, de norte a noreste, del centro de la ciudad hacia el oeste, y de oeste a noroeste. Como una de las primeras experiencias de transporte masivo moderno en Colombia, el Metro de Medellín corresponde a los planes urbanísticos más elaborados del departamento de Antioquia. (@ Metro de Medellín, 2011)

Actualmente posee 2 líneas con tecnología Metro, línea A y línea B.

La línea A tiene 23.2 kilómetros de longitud. Recorre el Valle de Aburrá desde la estación Niquía, en el municipio de Bello en el Norte, hasta el municipio de Itagüí en el Sur. La mayor parte del recorrido se hace paralelo al río Medellín, separándose de éste para atravesar el centro de la ciudad. Las estaciones de la línea A son: Niquía, Bello, Madera, Acevedo, Tricentenario, Caribe, Universidad, Hospital, Prado, Parque Berrío, San Antonio, Alpujarra, Exposiciones, Industriales, Poblado, Aguacatala, Ayurá, Envigado e Itagüí. Además se avanza en la ejecución de dos nuevas estaciones, Sabaneta y La Estrella, las cuales deberán estar listas para finales del 2011 y que a su vez adicionaran 2.5 kilómetros a dicha línea.

La línea B tiene 5.6 kilómetros de longitud, cinco estaciones elevadas y una a nivel. La línea va desde el centro en la estación San Antonio hasta el barrio San Javier en el Occidente de la ciudad. Las estaciones de la línea B son: San Javier, Santa Lucía, Floresta, Estadio, suramericana y Cisneros.

4.1 Historia.

La Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada – Metro de Medellín Ltda.- fue creada el 31 de mayo de 1979. Se constituyó con el fin de construir, administrar y operar el sistema de transporte masivo, generando desarrollo y buscando ofrecer CALIDAD DE VIDA a todos los habitantes del Valle de Aburrá. (@ Metro de Medellín, 2011)

Para llevar a cabo este proyecto se asociaron en partes iguales el Municipio de Medellín y el Departamento de Antioquia, posibilitando la creación de la Empresa. En 1979 comenzó la elaboración de los estudios de factibilidad técnica y económica, los cuales fueron realizados por la firma Mott, Hay & Anderson Ltda y cuyo contrato se extendió hasta desarrollar los pliegos de la licitación internacional. (@ Metro de Medellín, 2011)

En 1980 el proyecto se sometió a consideración del Gobierno Nacional, y su Consejo Nacional de Política Económica y Social le dio su aprobación en diciembre de 1982. Ese año se autorizó a la Empresa la contratación externa del 100% de los recursos necesarios para la obra y en 1984 se contrató la construcción con firmas alemanas y españolas. (@ Metro de Medellín, 2011)

El 30 de noviembre de 1995, a las 11:00 a.m., se inició la operación comercial en un primer tramo, entre las estaciones Niquía y Poblado en la Línea A; luego la red se extendió hasta Itagüí, cuatro estaciones más al Sur y al Occidente con seis estaciones en la Línea B. El 7 de agosto de 2004 entró en funcionamiento la Línea K, Metrocable del nororiente; el 3 de marzo de 2008 inició su servicio el segundo Metrocable, Línea J; y por último, en febrero de 2010 se puso en servicio la primera línea turística, Cable Arví, Línea L, al oriente cercano. (@ Metro de Medellín, 2011)

Actualmente, el Sistema cuenta con 32 estaciones: 19 en la línea A, seis en la línea B, tres en la línea K, tres en la línea J y una turística en el Cable Arví línea L. Hoy, después de 15 años de funcionamiento, se atiende el 19,6% del mercado de

transporte en el área de influencia directa: Bello, Medellín, Itagüí, Envigado y Sabaneta y otros municipios indirectamente. (@ Metro de Medellín, 2011)

Al finalizar el año 2010 el METRO superó los 1.730 millones de viajes realizados en el Sistema, brindando seguridad, rapidez, información y presentación, atributos que caracterizan el servicio. (@ Metro de Medellín, 2011)

4.2 Misión.

Somos una empresa pública dedicada al transporte de pasajeros y negocios conexos, con un talento humano competente y comprometido, que presta un excelente servicio y genera Cultura Metro, para contribuir a la calidad de vida de la comunidad. (@ Metro de Medellín, 2011)

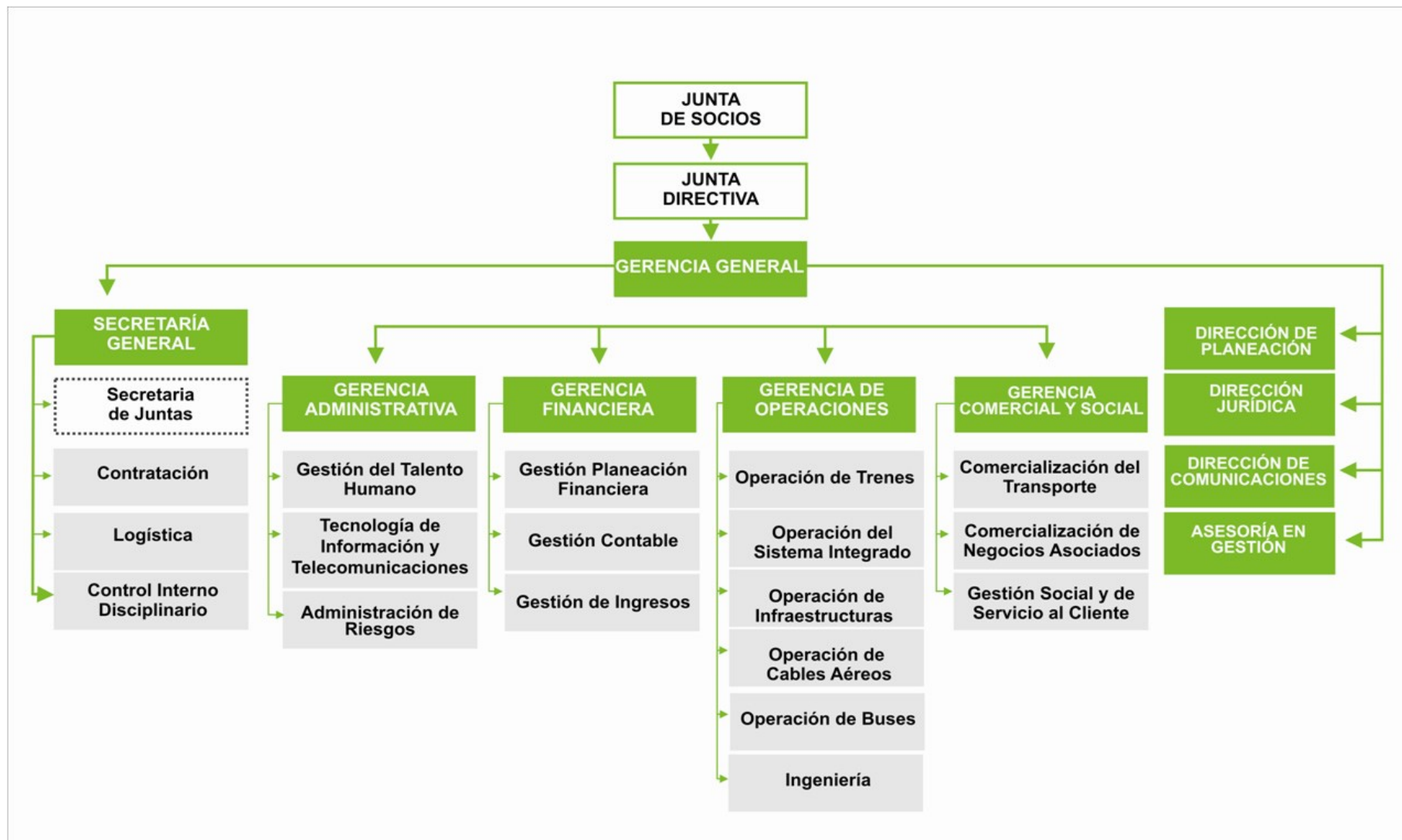
4.3 Visión.

En el 2030 seremos una organización de categoría mundial, líder en el servicio de transporte público, con participación adecuada en empresas y negocios asociados, que genera cultura ciudadana y rentabilidad social y financiera, que le permita crecer y contribuir al desarrollo metropolitano, regional y nacional. (@ Metro de Medellín, 2011)

4.4 Estructura Organizacional.

Actualmente el Metro de Medellín está compuesto por una estructura organizacional muy amplia, la cual se puede observar en la siguiente ilustración. Dicha estructura está dividida en 3 áreas principales, las cuales son el área de soporte, área estratégica y área misional. El Área de Soporte está compuesta por la Secretaría General, la Gerencia Administrativa y la Gerencia Financiera. El Área Estratégica se compone de la Gerencia General con el soporte de la Dirección de Planeación, la Dirección Jurídica, Asesoría en Gestión y la Dirección de Comunicaciones. El Área Misional está conformada por la Gerencia de Operaciones y la Gerencia Comercial y Social.

Ilustración 29. Organigrama del Metro de Medellín.



(@ Metro de Medellín, 2011)

5. MANTENIMIENTO DE RUEDAS, METRO DE MEDELLÍN

La Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada posee dentro de su portafolio de negocios asociados atractivos productos y servicios para ofrecer a empresas tanto nacionales como extranjeras, con el fin de satisfacer la demanda de soluciones adecuadas a los requerimientos de administración, planeación, mantenimiento, expansión, tecnología de sistemas de transporte y desarrollo de personal e implementación de modelos educativos. (@ Metro de Medellín, 2011)

Como se menciona en el capítulo anterior, existen unas áreas misionales, dentro de las cuales se encuentra la gerencia de operaciones, y que a su vez es la encargada del soporte tecnológico, técnico, operativo y de mantenimiento del Metro de Medellín. La gerencia mencionada tiene una estructura tal como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 30. Organigrama del Departamento de Mantenimiento.



(@ Metro de Medellín, 2011)

Cada una de las áreas de la Gerencia de Operaciones se encarga de ciertas tareas. El Área de Operación de Trenes debe encargarse de la Operación y Mantenimiento de trenes. El Área de Operación del Sistema Integrado se encarga del Tráfico y Mantenimiento de vías y catenaria. El Área de Operación de Infraestructuras debe velar por la Operación y Mantenimiento de edificaciones y estaciones. El Área de Operación de Cables Aéreos es responsable de la Operación y Mantenimiento de telecabinas. El Área de Operación de Buses es el área más nueva de la gerencia y está encargada de la Operación y Mantenimiento de buses. Por último, está el Área de Ingeniería, la cual se encarga de brindar soporte tecnológico y operativo.

5.1 NIVEL INSTRUMENTAL

En el Metro de Medellín definen el mantenimiento como la realización de una serie de actividades con el objetivo de que una máquina, equipo, sistema, componente o instalación se mantenga en condiciones de buen funcionamiento. Por tal motivo la Gerencia de Operaciones está encargada de mantener la disponibilidad de las máquinas, garantizar la seguridad y la capacitación del personal.

Para que todo esto se cumpla, el Metro de Medellín cuenta con amplios talleres en los cuales se pueden llevar a cabo todas las labores de mantenimiento. Entonces para realizar el mantenimiento de las ruedas el metro cuenta con equipos y con instalaciones físicas dedicadas solo a dicho componente, las ruedas. Entre las instalaciones, se cuenta con una bodega en la cual está ubicado el torno para el reperfilado de ruedas y dentro de la cual se realizan las labores de inspección.

5.1.1 Información.

La información es uno de los principales componentes del mantenimiento en el Metro de Medellín, pues gracias a ella se puede conocer el estado de cada uno de los equipos y su historia. Actualmente toda esta información es almacenada en el SAP, el cual es un sistema de información gerencial o software de administración de empresas. Aunque años atrás la información era almacenada en bases de datos de EXCEL aún se cuenta con ella.

El SAP permite que todo el personal que está involucrado con el mantenimiento de las ruedas y de los demás equipos pueda ingresar o generar historia de estos, además permite revisar y conocer el histórico por equipos, sistemas, componentes o partes. Por otra parte, el SAP permite la comunicación entre diferentes áreas, es decir, mantenimiento puede conocer el valor de los equipos o partes, el costo de las labores de mantenimiento, su presupuesto, entre otros, además de la comunicación directa con áreas tales como compras, producción, almacén de repuestos, etc.

El Metro es pionero en la implementación de SAP, y para su operación se cuenta con personal de amplia experiencia que conforma el Centro de Competencias, que facilita el manejo de esta herramienta al interior de la organización. Este grupo humano está en capacidad de ofrecer talleres de acercamiento al software SAP, con el fin de proporcionar herramientas y conocimientos adicionales para su manejo. (@ Metro de Medellín, 2011)

El SAP cuenta con un modulo de mantenimiento que le permite al personal del Metro de Medellín realizar las siguientes tareas, que para el caso de este trabajo es respecto a las ruedas:

- Registro de los equipos con sus partes y componentes.
- Histórico de las órdenes de trabajo y el detallado de cada una de estas,
- Creación y control de órdenes de trabajo.
- Personal capacitado.
- Histórico de mantenimientos, tanto planeado como correctivo.
- Histórico de paros y fallas de los equipos.
- Costos y gastos de operación y mantenimiento.
- Análisis de fallas.
- Planes de mantenimiento.
- Técnicas e instructivos de mantenimientos y operación.

Por otra parte, los técnicos encargados del mantenimiento de las ruedas, manejan una base de datos en EXCEL, la cual cuenta con información generada desde el año

1990, que a su vez contiene cada una de las actividades realizadas sobre cada uno de los ejes según su código. Dicha base de datos les permite a los técnicos generar historia y acceder rápidamente a la información completa de las ruedas.

La base de datos de EXCEL contiene el histórico completo de las ruedas con sus respectivos datos tales como: eje, unidad, modificación y reperfilados, recorrido en kilómetros por eje, costos, entre otros. Además nos muestra que las ruedas ingresan a prestar su servicio con un diámetro aproximado de 850 mm y son descartadas o sacadas de servicio cuando alcanzan un diámetro mínimo y aproximado de 800 mm después de los diferentes reperfilados.

Toda esta información además de ser almacenada en la base de Datos de EXCEL, también debe ser almacenada en SAP.

Además del SAP y la base de datos de EXCEL, también se maneja una planilla en la cual los técnicos encargados del mantenimiento de las ruedas, deben realizar control a la geometría de las ruedas cada vez que estas pasan por tareas de inspección o de perfilado. Dicha planilla se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 31. Planilla para el control de la geometría de las ruedas del material rodante.

CONTROL DE LA GEOMETRÍA DE LAS RUEDAS DEL MATERIAL RODANTE



UNIDAD N°	Km CMA:	FECHA:	AVISO
	Km CMB:	COND. INIC.	ORDEN
VEHIC. AUX.	KM/Hr:	COND. FIN.	RESERVA

	EJE N°	SERIE	RUEDA	SD	SH	QR	DIÁMETRO	REDONDEZ PTO 70				RESPONSABLE
C M A	1		R									
			L									
	2		R									
			L									
	3		R									
			L									
	4		R									
			L									
C R	5		R									
			L									
	6		R									
			L									
	7		R									
			L									
	8		R									
			L									
C M B	9		R									
			L									
	10		R									
			L									
	11		R									
			L									
	12		R									
			L									

ACT. LZB CMA:		ACT. SIBAS CMA		ACT. ANTIDESLIZ. CMA	
ACT. LZB CMB:		ACT. SIBAS CMB		ACT. ANTIDESLIZ. CR	
				ACT. ANTIDESLIZ. CMB	

(Metro de Medellín Ltda., 2011)

5.1.2 Maquinaria y Equipos.

El Metro de Medellín cuenta con 42 unidades, entre las cuales están las unidades de pasajeros y los vehículos auxiliares. Las unidades de pasajeros están conformadas por 3 vagones cada una, de los cuales hay 2 vagones Coche Motor (A y B) y 1 vagón Coche Remolque, dicha distribución se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 32. Distribución de una unidad de pasajeros.



(@ Metro de Medellín, 2011)

Además de las unidades de pasajeros, el Metro de Medellín cuenta con vehículos auxiliares los cuales son importantes para tareas mantenimiento de vías y transporte

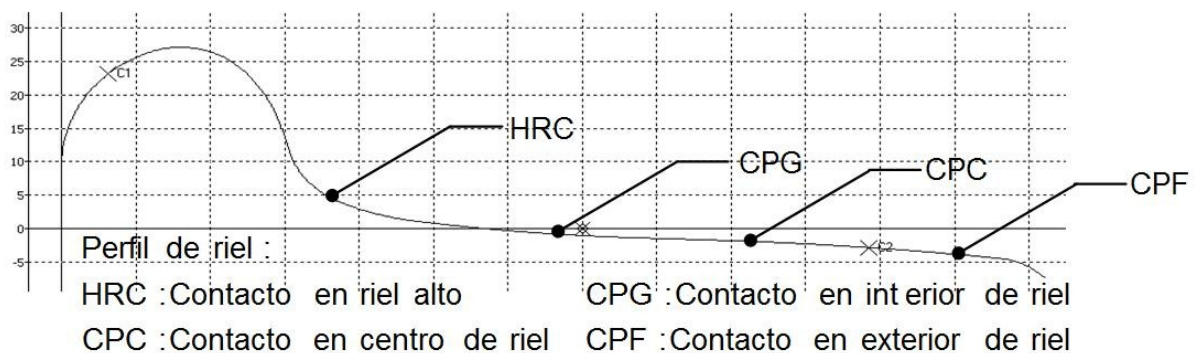
de técnicos. Los siguientes son los vehículos auxiliares que posee en la actualidad el Metro de Medellín.

- Locomotora.
- Dresina de personal.
- Tolvas para el transporte de balasto.
- Vehículo Catenaria.
- Plataforma.
- Bateadora.
- Esmeriladora de rieles.
- Dresina grúa.
- Unimog ferroviario.

Por otra parte, cabe anotar que cada vagón de pasajeros posee 4 ejes, que para el caso del coche motor cada eje posee un motor, y para el coche remolque son 4 ejes sin motor. Es decir que cada unidad de pasajeros posee 12 ejes y cada eje posee dos ruedas, entonces cada unidad tiene un total de 24 ruedas.

El Metro de Medellín cuenta con vehículos de pasajeros que poseen ruedas con perfil NRC y vehículos auxiliares que poseen ruedas con perfil DIN. El perfil NRC se desgata de una manera uniforme en la superficie de rodadura y posee diferentes puntos de contacto con el riel. En la siguiente ilustración se puede observar dicho perfil.

Ilustración 33. Perfil de rueda NRC.



Además de poseer un perfil de rueda NRC, estas son fabricadas bajo la norma UIC 812-3, la cual habla de las especificaciones técnicas para el suministro de ruedas monobloque de acero no aleado laminado para el material rodante motor y remolcado. Dicha norma también es usada en Europa para el suministro de ruedas. En la siguiente tabla se presentan las especificaciones técnicas de las ruedas del Metro de Medellín.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de las ruedas de pasajeros.

NORMAS		
Fabricación	UIC 812-3	
Pruebas	UIC 812-3	Análisis químico. Pruebas de tensión. Prueba de impacto. Impresión Braumann. Uniformidad de dureza de pestaña. Tensiones residuales. Prueba de ultrasonido. Aspecto y dimensiones.
PLANOS ASOCIADOS		
Rueda del eje motor (Rueda motriz):	Plano No: X81320-MAE-MF-004 (432-1-002669b)	
Rueda del eje remolque (Rueda remolque)	Plano No: X81320-MAE-MF-004 (432-1-002672b)	
Perfil de la rueda	Plano No: NRC-MM Wheel Profile (by: National Research Council) Diseño para Metro de Medellín por NRC	
ESPECIFICACIONES GENERALES		
Proceso	Ruedas forjadas (según UIC 812)	
Material	Acero R8T (UIC 812) Plano: X81320-MAE-MF-004 (432-1-002669b).	
Resistencia	860 – 980 Ne/mm2, plano: X81320-MAE-MF-004 (432-1-002669b).	

ESPECIFICACIONES GENERALES	
Diámetro del orificio central	174 mm +/-1 mm sin ranura de distribución del aceite.
Tolerancia del perfil de rodadura	+/- 0.5 mm.
Acabado superficial del perfil de rodadura	12.5 um.
Desbalanceo estático permisible	< 62 gm, Plano X81320-MAE-MF-004 (432-1-002669b).
Detalle ranura indicadora de desgaste	Plano X81320-MAE-MF-004 (432-1-002669b).
Tolerancias geométricas	Según UIC 800 – 51012.
Marcas en la rueda	Según Las normas UIC aplicables.
Recepción en fabrica	Según norma Din 50049 y las normas UIC aplicables.
Protección para el transporte	Según la Norma UIC 812, UIC 842 y otros aplicables.

(Metro de Medellín Ltda., 2011)

5.1.3 Herramientas, Repuestos, Materias Primas e Insumos.

Para que se lleven a cabo las labores o tareas de mantenimiento en el Metro de Medellín, los encargados del mantenimiento de las ruedas cuentan con un espacio o taller especialmente diseñado y pensado para ello y con una serie de instrumentos y equipos que les ayudan a cumplir con dichas tareas.

En dicho espacio, el taller, se encuentra el principal equipo y que a su vez se puede considerar como el equipo o herramienta más crítica para cumplir con el mantenimiento de las ruedas es la perfiladora, y con la cual se brinda un servicio con rapidez y agilidad en la entrega de ruedas reperfiladas de alta calidad, atendiendo los estándares internacionales. En la siguiente ilustración se puede observar el taller y la perfiladora de ruedas del Metro de Medellín se puede observar en la ilustración 35.

Ilustración 34. Taller de mantenimiento de ruedas, perfiladora. Metro de Medellín.



Ilustración 35. Perfiladora de ruedas, Metro de Medellín.



Además de contar con la perfiladora de ruedas, el personal del metro cuenta con el *miniprof*, un medidor de pestaña, el medidor de trocha, un medidor de diámetro y con un comparador de caratula. Con estos cinco instrumentos los técnicos pueden conocer el estado de la geometría de las ruedas y a su vez de los parámetros más importantes, tales como el S_d , S_h , Q_r , el diámetro y la excentricidad de la rueda, dichos parámetros se referencian desde la cara interna, pues así lo dice el procedimiento estándar. En las siguientes ilustraciones se puede observar algunos

de los instrumentos de medida con los cuales cuenta el personal para el mantenimiento de ruedas del Metro de Medellín.

Ilustración 36. *Miniprof*, Metro de Medellín.



(Metro de Medellín Ltda., 2011)

Ilustración 37. Medidor de pestaña.



Ilustración 38. Medidor de diámetro.

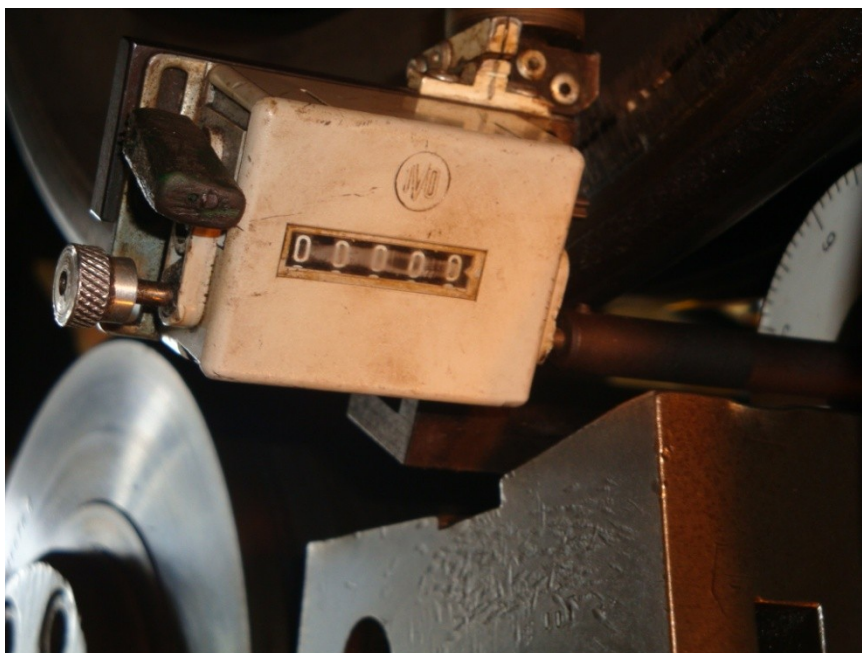


Ilustración 39. Comparador de caratula.



Para verificar la calibración de las herramientas manuales, el personal cuenta con un conjunto de rueda-eje patrón, el cual tiene aproximadamente 812 mm de diámetro (no es el diámetro de fábrica) pero con el perfil de fábrica, es decir, sin desplazar

plantilla. Aproximadamente cada 3 meses se realiza esta verificación. Ver la siguiente ilustración.

Ilustración 40. Conjunto rueda-eje patrón.



Por otra parte se tienen los repuestos e insumos para realizar el mantenimiento. Los repuestos son básicamente las ruedas nuevas, mientras que los insumos son para las tareas de reperfilado, dichos insumos son las pastillas de carburo y la grasa de lubricación de pestaña para cubrir el perfil de la rueda cuando se perfila.

Los costos asociados a las labores de perfilado o consumibles de la perfiladora son las pastillas de carburo con un costo \$45.820 y 55 Kg de grasa lubricadora con un costo de \$4.960.000. No hay más insumos físicos en el proceso, pero existen otros costos durante el proceso, los cuales están relacionados con los tiempos de operación, la mano de obra, el consumo energético y los desperdicios, por eso en la siguiente tabla se pueden observar dichos costos.

Tabla 8. Costos mantenimiento de ruedas*.

OPERACIÓN					
CANTIDAD (Unidades)		Tiempos (Minutos)			
		Transporte	Inspección	Reperfilado	Total
INSPECCIÓN + REPERFILADO	1	10	240	1200	1450
INSPECCIÓN	1	10	240	0	250
PERSONAL					
PERSONAL	TIEMPOS		COSTO		
Operario	Horas Laborales	Hora Inspección	Costo Empresa	Costo/hora Trabajada	
1	8	4	\$ 3.027.360	\$ 12.614	
Disminución en las maniobras que debe realiza el conductor, puesto que el sistema va estar en un punto estratégico, para evitarlas.					
COSTO ENERGÉTICO					
Unidades	Consumo (KwH/Km)	Costo (KwH)	Costo Total		
1	9	\$ 220	\$ 1.980		
4	36	\$ 220	\$ 7.920		
DESPERDICIOS					
Tipo	Cantidad/ rueda (Kg)	# Ruedas	Total (Kg)		
Limalla	2	24	48		
Rueda	Ø 800 mm, cuando ya queda inservible				

Estos datos son tomados del sistema de información del Metro de Medellín por personal de la Empresa en Septiembre de 2011. (Metro de Medellín Ltda., 2011)

5.1.4 Personal Capacitado.

El personal es con quien realmente cuenta el Metro de Medellín para realizar todas sus actividades de mantenimiento y es por esto que esta empresa cuenta con personal calificado y con amplia experiencia en la operación y mantenimiento de

sistemas férreos y de cables, y que está dispuesto a prestarle el mejor servicio de capacitación a empleados y técnicos de otras empresas de transporte.

Para contar con dicho personal la empresa ha dispuesto ciertos requisitos:

- Experiencia en mantenimiento y operación de equipos.
- Orientación a los resultados acordes con el Plan Maestro.
- Conocimiento del entorno industrial.
- Pensamiento innovador.
- Estudio permanente de normas ferroviarias tales como la UIC, ISO y CEN.
- Respeto por la propiedad intelectual.

En especial para las labores de mantenimiento de ruedas ferroviarias el metro cuenta actualmente con 2 personas que realizan estas tareas. Pero cada que entra o llega una persona nueva a realizar estas actividades, debe pasar primero por una etapa de entrenamiento para poder estar calificado y cumplir con su deber.

5.2 NIVEL OPERACIONAL

Como se menciona anteriormente, este segundo nivel del mantenimiento plantea las posibles acciones que pueden ejecutarse en mantenimiento, comprende básicamente tareas de mantenimiento antes y después de la falla real o potencial.

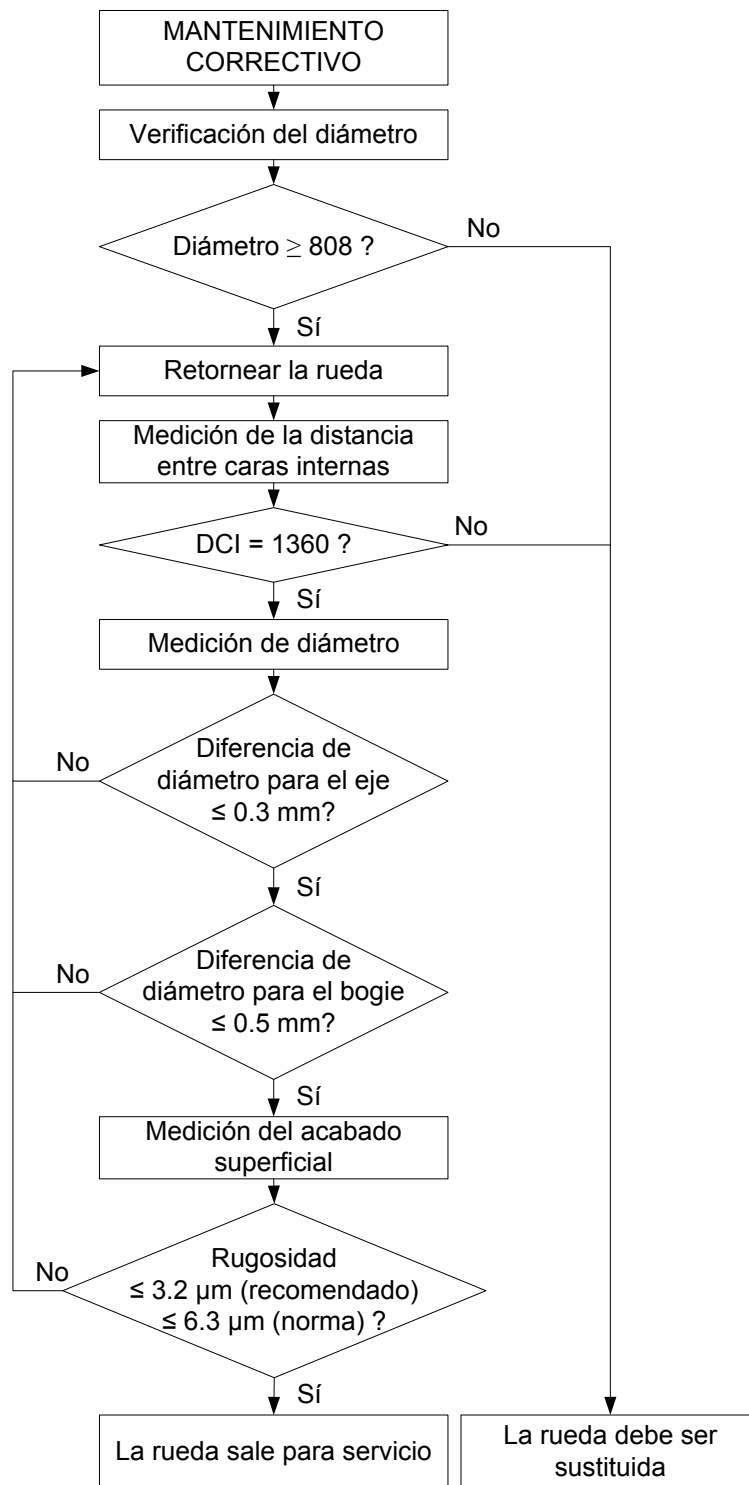
Por tal motivo es que en el Metro de Medellín se realizan actividades de mantenimiento correctivo, predictivo, preventivo y rediseño de las máquinas. Allí los técnicos observan, piensan y analizan las posibles tareas a ejecutar para dar solución a los problemas presentes en los equipos.

Además de pensar en las posibles soluciones, el personal está en capacidad de realizar inspecciones y otras acciones catalogadas como reparaciones o mantenimientos de equipos.

Las soluciones que da el personal de mantenimiento a sus ruedas son básicamente tres (3): inspección, reperfilado y cambio de ruedas.

5.2.1 Acciones Correctivas.

Ilustración 41. Flujograma del mantenimiento correctivo.



(Metro de Medellín Ltda., 2011)

En la ilustración anterior se puede observar la toma de decisiones para las diferentes acciones que se pueden tomar como mantenimiento correctivo.

Dentro de las acciones correctivas que se aplican en el Metro de Medellín están el reperfilado y el cambio o sustitución de ruedas.

- Reperfilado.

Esta acción básicamente es correctiva cuando en vía el tren realiza maniobras fuera de lo común, tales como fallo de válvula del sistema antideslizamiento o frenados de emergencia o bruscos. Dichas maniobras no son comunes y hacen que la rueda se deslice sobre la vía, lo cual genera una deformación o aplanamiento de la rueda, o de otro modo, una superficie plana (tallón) sobre la superficie de rodadura de ambas ruedas. El plano aparece en ambas ruedas debido a que las ruedas y el eje forman un mismo conjunto fijo.

Los trenes del Metro de Medellín no presentan este tipo de defectos comúnmente. Pero cuando esto sucede, dichos defectos se notan fácilmente, pues el conductor o los pasajeros sienten que hay un golpeteo o que el tren brinca.

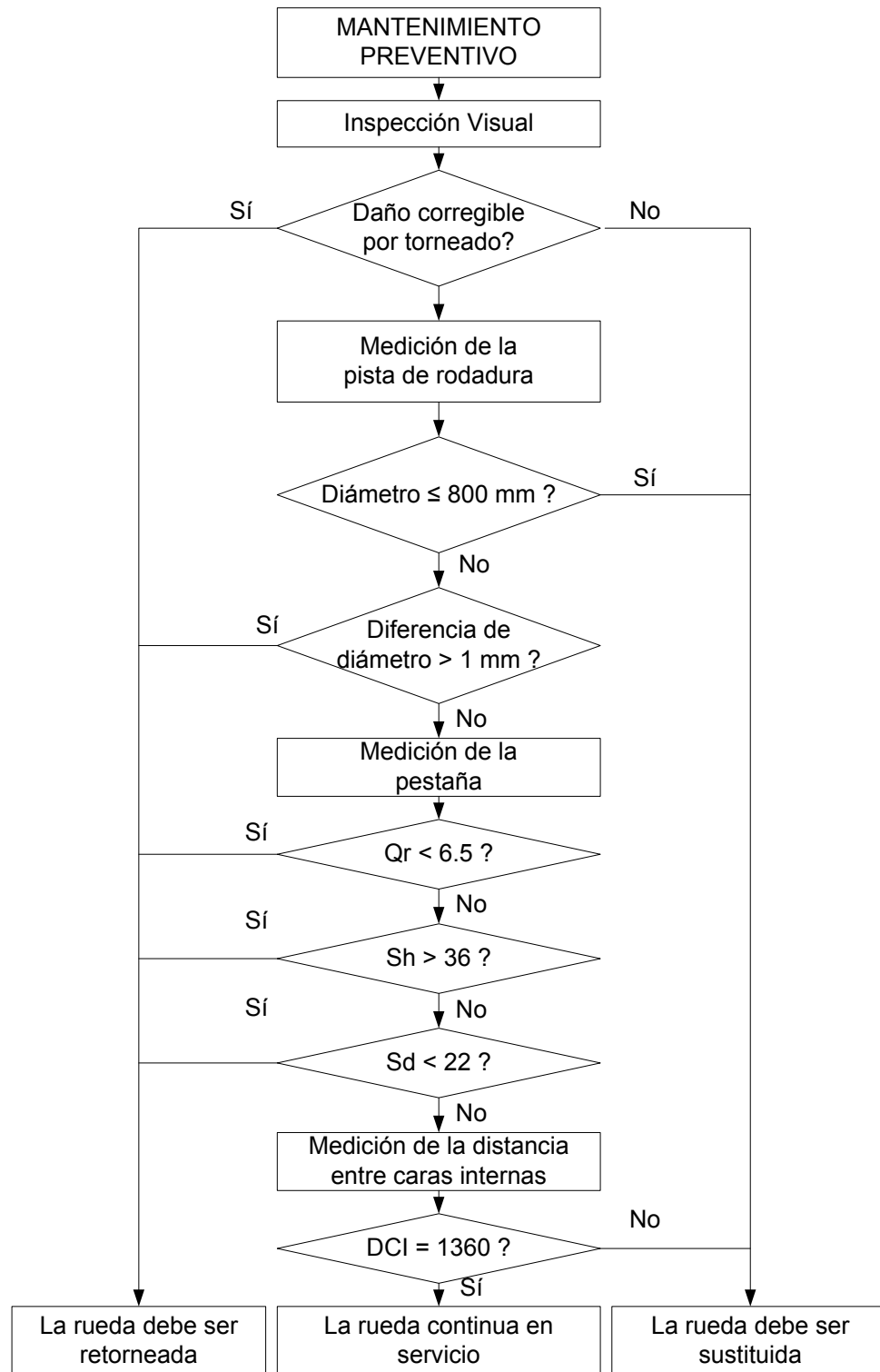
El perfilado para eliminar las superficies planas sobre la superficie de la rodadura, implica sacrificar mucho diámetro a la rueda para sacar el plano a ambas ruedas, pero además implica realizarle perfilado a todas las ruedas para dejarlas dentro de las tolerancias permitidas.

- Cambio de ruedas.

Como se observa en la ilustración 41 la sustitución de ruedas se realiza básicamente cuando las ruedas no pueden ser una vez más reperfiladas, es decir, cuando su diámetro es inferior a 808 mm y según el instructivo cuando es inferior a 800 mm, lo cual no permite dar un perfil nuevo a la rueda.

5.2.2 Acciones Preventivas.

Ilustración 42. Flujograma del mantenimiento preventivo.



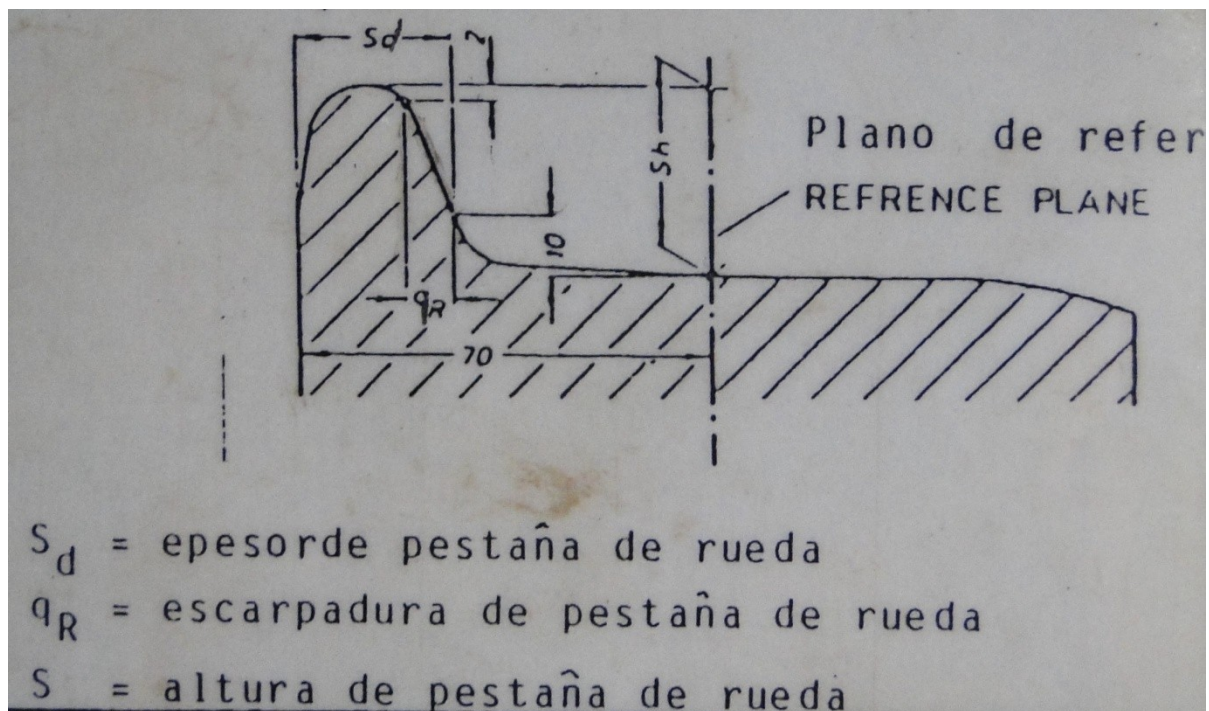
(Metro de Medellín Ltda., 2011)

El mantenimiento preventivo de ruedas en el Metro de Medellín contempla básicamente 3 actividades: inspección, perfilado cada cierto kilometraje e inversión de la unidad. Se debe tener en cuenta que el perfilado como actividad preventiva depende de las inspecciones rutinarias que se realizan a las ruedas.

Dichas inspecciones se realizan de acuerdo al flujograma de la ilustración anterior y pueden ser catalogadas de la siguiente manera: inspección visual y revisión de parámetros del perfil de rodadura. Los siguientes parámetros son los que se evalúan o revisan durante las labores de inspección y perfilado.

- Medición de diámetro de la rueda.
- Medición de la excentricidad de la rueda. Perdida de redondez.
- Medición de la geometría de la rueda con el *miniprof*, es decir, la altura de la pestaña (S_h), el espesor de la pestaña (S_d) y la escarpadura de la pestaña (q_R). En la siguiente ilustración se pueden observar los parámetros de geometría de la rueda

Ilustración 43. Parámetros de la geometría de la rueda.



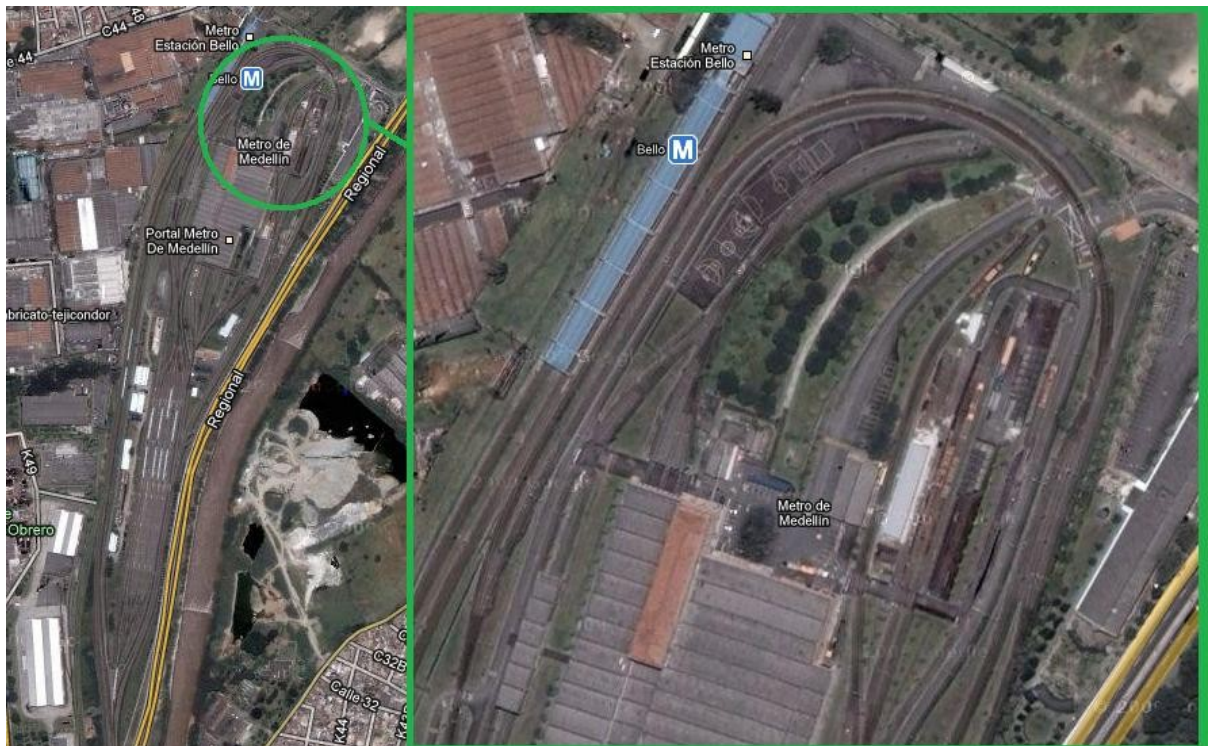
(Metro de Medellín Ltda., 2011)

- Inversión de la unidad.

Esta acción se realiza en el lazo de viraje con el fin de invertir la unidad de vagones. Esta inversión evita que la pestaña de una rueda sufra o se deforme más que la otra. Es por eso que cada 3700 km se debe realizar dicha tarea, que también es llamada servicio semanal o menor. De tal modo que antes de la inversión, la unidad en sentido Itagüí Niquía era conducida por el CMA y después de esta, la unidad en el mismo sentido será conducida por el CMB.

Cuando se invierte la unidad, las ruedas y su escarpadura (Qr) se desgastan de una manera más homogénea lo cual evita sacrificar diámetro a la hora del perfilado de la rueda. En la siguiente ilustración se puede observar el lazo de viraje, este lazo de viraje se encuentra en los talleres del Metro de Medellín a la altura de la estación Bello.

Ilustración 44. Lazo de viraje en los talleres.



(@ GOOGLE, 2011)

- Inspecciones.

Debido a la falta de disponibilidad de personal capacitado para realizar las labores de inspección de ruedas, los técnicos vienen manejando inspecciones con una frecuencia entre 20.000 y 30.000 km aproximadamente.

Como se menciona anteriormente, las labores de inspección son básicamente 2: la inspección visual y la medición de los parámetros de la geometría del perfil de la rueda.

Durante las labores de inspección visual, el técnico debe revisar que las ruedas no presenten los siguientes daños:

- Acanaladuras.
- Rayas.
- Exfoliaciones.
- Escamaciones: Este defecto es un flujo laminar de metal en toda la banda de rodadura.
- Descascarillado, cavidades: Pérdida de materiales locales en una zona limitada de la superficie de rodadura.
- Exfoliación: Este defecto de corta longitud es una pérdida de material localizada en toda la superficie de rodadura.
- Zonas planas (aplanamientos).
- Excrecencias metálicas: Exceso de material.
- Deslizamientos (puntos calientes): Cambios de coloración del acero, tono azulado o quemado de la pintura, debidos al calentamiento de la rueda.
- Grietas térmicas: Si los signos de calentamiento se pueden ver en la llanta de la rueda, el uso de partículas magnéticas o líquidos penetrantes se puede utilizar para encontrar cualquier fisura que pueda haberse formado.
- Inspeccionar visualmente en busca de fisuras el área visible de la pestaña de la rueda.

- Comprobar visualmente cualquiera de las siguientes defectos en la llanta de la rueda:
 - Grietas radiales.
 - Aflojamiento del ajuste de la rueda en el eje (signos como el polvo óxido, o señales de que la rueda está mal alineada con el cuerpo del eje). (GEMI, Universidad EAFIT, 2011).

Si en la inspección visual se observa alguno de los defectos anteriores entonces se debe revisar y analizar si esto puede ser solucionado mediante el reperfilado de la rueda, de lo contrario la rueda debe ser retirada de servicio.

Luego de realizar la inspección visual, se procede a la medición de los parámetros de geometría de la rueda.

Primero se realiza la medición del diámetro de la rueda y se compara si aun esta dentro de las tolerancias admisibles de operación. Ver en la siguiente tabla las tolerancias admisibles entre ruedas del mismo eje, del mismo bogie, entre bogies y entre coches.

Tabla 9. Tolerancias admisibles en los diámetros de las ruedas.

PARÁMETRO	DIFERENCIA MÁXIMA DE DIÁMETROS
Entre ruedas del mismo eje	0.3 mm
Entre ruedas del mismo bogie	0.3 mm
Entre bogies	3 mm según manual 5 mm según experiencia
Entre coches	20 mm

Cabe anotar que las ruedas llegan de fábrica con un diámetro aproximado de $850 \pm 0,5$ mm y son desechadas en el momento en que alcanzan aproximadamente los 800 mm de diámetro. Por otra parte, se debe tener en cuenta que una rueda consume 1 mm de su diámetro cada 17.000 km de recorrido aproximadamente, y que dependiendo de si es un coche motor o un coche remolque, su consumo anual sería diferente, que para el caso del CR son 6 mm de diámetro y del CM son 8 mm de

diámetro que se desgastan las ruedas anualmente en condiciones ideales de funcionamiento.

Luego, se sigue con la medición de los parámetros del perfil de la rueda, que como se menciona anteriormente son:

- La altura de la pestaña, Sh.
- La escarpadura o inclinación de la pestaña, Qr.
- El espesor de la pestaña, Sd.

En el caso en que alguno de estos valores se encuentre por fuera de los límites de operación, o tolerancias admisibles, se debe realizar el perfilado a las ruedas. En la siguiente tabla se observan los límites permisibles para cada uno de los parámetros.

Tabla 10. Límites de operación de la rueda.

PARÁMETRO	TOLERANCIA
Altura de la pestaña	32 – 36 mm (máximo admisible)
Escarpadura de la pestaña	6,5 mm (mínimo admisible)
Espesor de la pestaña	22 – 28 mm (mínimo admisible)

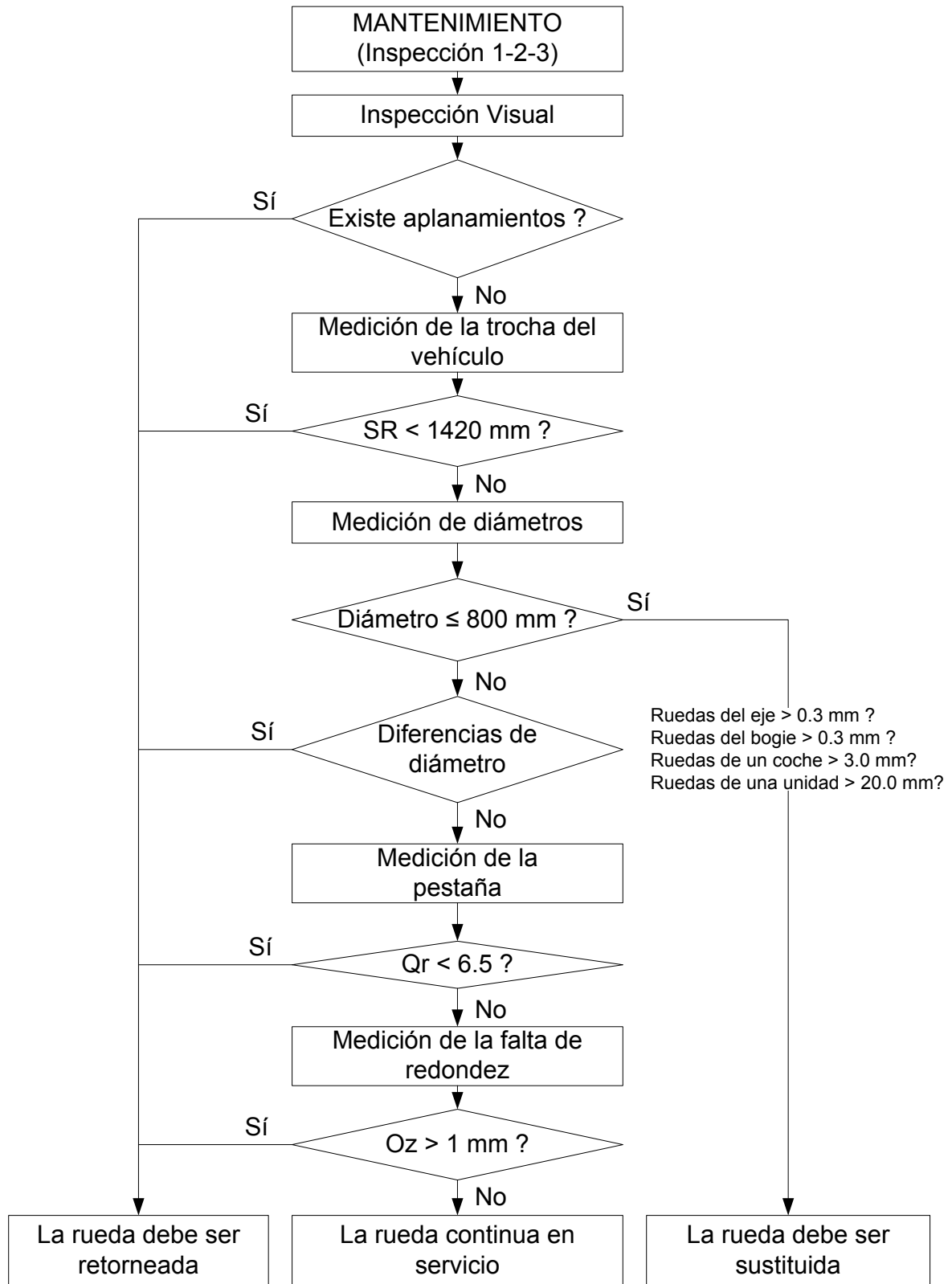
La siguiente ilustración muestra como se ubican los instrumentos de medida para la revisión de los parámetros de la geometría de la rueda.

Ilustración 45. Medición de la geometría de la rueda.



En la siguiente ilustración se puede observar el proceso de inspección visual y medición de parámetros según el instructivo de mantenimiento de ruedas del Metro de Medellín, además allí se puede observar los valores o límites permitidos según norma.

Ilustración 46. Flujograma de inspección según manual.



(Metro de Medellín Ltda., 2011)

- Perfilado.

Esta tarea como acción preventiva se realiza entre los 60.000 y 80.000 km de operación, es decir, cada 6 meses aproximadamente. Como se puede observar el Metro de Medellín cuenta con una máquina perfiladora de ruedas ferroviarias en la cual realizan la recuperación del perfil de rodadura. Dicha labor, es realizada según el perfil UIC-ORE, DIN 5573-E1424-135, el cual determina que las ruedas deben estar perfiladas según las tolerancias y límites presentados en las tablas 9 y 10.

Además, como se ve en la ilustración anterior, la cual indica que la rueda aun puede ser reperfilada si presenta su diámetro mayor a 800 mm, ya que de lo contrario no podría ser reperfilada y tendría que ser sustituida y salir de servicio.

6. RECOMENDACIONES

Como se dijo desde el principio, se van a realizar recomendaciones al Metro de Medellín para mejorar sus labores de mantenimiento sobre las ruedas ferroviarias de sus trenes y vehículos auxiliares. Es por esto que en este capítulo se desarrolla o comenta como mejorar dichas labores o que se puede hacer para perfeccionar estas.

Debido a la falta de personal, se puede aumentar al menos en una persona más el personal capacitado para realizar las labores de mantenimiento de ruedas, ya que esto reduciría el tiempo entre inspecciones, que a su vez aumentaría la vida útil de las ruedas.

También se evidencia que dentro de las labores de mantenimiento y revisión de parámetros, no se mide la separación entre caras internas de las ruedas en las rutinas de inspección, y que este parámetro solo es revisado durante el montaje del conjunto rueda eje. Por tal motivo se recomienda la revisión de la separación entre caras internas durante las inspecciones a las ruedas del Metro de Medellín.

Es importante revisar continuamente todas las normas ferroviarias que existen en la actualidad, debido a que estas constantemente son revisadas y mejoradas por las diferentes compañías que de ellas participan.

Cuando los usuarios y conductores de los vagones del Metro de Medellín evidencian o sienten golpeteos, estos informan de una manera muy simple dicha anomalía. Por esto, se recomienda implementar en un futuro un sistema de alerta que le permita al conductor informar problemas que posiblemente son causados por defectos en las ruedas. Dicho sistema podría ir enlazado o comunicado con el sistema de mantenimiento SAP, y a su vez con un sistema de tecnología RFID que permita reconocer y enviar de manera oportuna el tren a revisión o inspección, la alerta

puede ser enviada al área encargada del mantenimiento de ruedas mediante el SAP, para que estos realicen la programación necesaria.

Por último, y como recomendación más importante, se sugiere la implementación de un sistema de monitoreo con tecnología de visión artificial o de escaneo laser, ya que estos sistemas ayudan a reducir notablemente los tiempos de intervención y por ende los costos de mantenimiento. En el capítulo 3, título 3.5, subtítulo 3.5.3, sección “Equipos para el monitoreo de ruedas”, se puede observar por qué se debe recurrir a un sistema de estos en el Metro de Medellín y los diferentes proveedores de dicha tecnología.

7. CONCLUSIONES

Sin lugar a duda, las ruedas son probablemente el componente más simple e importante usado en la industria ferroviaria. Por esto, es que se realiza este proyecto para dar a conocer el por qué del cuidado y mantenimiento del material rodante.

Es evidente que el Metro de Medellín posee RCM como filosofía de mantenimiento y que aún tiene muchas cosas por mejorar en esta área, en especial en el mantenimiento de ruedas ferroviarias.

Debido a la alta competencia a nivel mundial, toda empresa debe tener sus procesos certificados para poder sobresalir en este mundo tan competitivo. Por tal motivo, el Metro de Medellín cuenta con las diferentes certificaciones para llevar a cabo sus procesos de mantenimiento en toda la planta.

La práctica y la experiencia son necesarias antes de ser competente para realizar con rigor y eficiencia las labores de inspección de un componente tan importante como lo son las ruedas ferroviarias.

Dado que es imposible medir todas las ruedas de los vagones en cada uno de los puntos de inspección para todos los posibles defectos, los técnicos encargados del mantenimiento de ruedas ferroviarias deben aprender de la experiencia para reconocer los posibles defectos visualmente, además deben combinar las habilidades visuales y auditivas para sentir y detectar condiciones peligrosas de este componente ferroviario, aún bajo condiciones de difícil acceso y oscuridad propias de la inspección bajo los vagones.

Los nuevos técnicos encargados del mantenimiento de las ruedas ferroviarias deben tratar en lo posible realizar inspecciones y mediciones lo más exacto y real que se pueda, todo esto bajo el acompañamiento de personal experimentado. Es decir, que

cuando se tenga un nuevo técnico en capacitaciones se le debe vincular y acompañar lo más que se pueda en las labores de mantenimiento, para que este se pueda enfrentar de una manera más segura a dichas labores.

Siempre que se realicen labores de inspección y mantenimiento de ruedas o de cualquier otro componente ferroviario, se deben tener en cuenta todas las normas y recomendaciones de seguridad para que estas labores se puedan realizar normalmente sin que se ponga en riesgo la vida de quienes allí participan.

Los defectos que se presentan en las ruedas ferroviarias del Metro de Medellín son básicamente por pérdida de redondez y pérdida de geometría de los parámetros del perfil de la rueda, pero además de estos 2 defectos, se pueden encontrar en ocasiones muy poco frecuentes la aparición de aplanamientos debido a frenados de emergencia.

Debido a que las ruedas del Metro de Medellín son inspeccionadas con cierta regularidad, es difícil y casi que imposible encontrar defectos como escamaciones, exfoliaciones y otros defectos que evidencian notablemente la pérdida de material.

Es claro que el Metro de Medellín aún tiene mucho que mejorar en sus labores de mantenimiento debido a que aún hay ciertas cosas que son realizadas por inspección visual por los técnicos encargados, por esto es que en el capítulo anterior se realizan algunas recomendaciones para mejorar las labores o técnicas allí utilizadas.

Dada la alta demanda actual de tecnología por parte del sector ferroviario, se pueden encontrar gran cantidad de compañías que brindan soluciones a los diferentes problemas que aparecen día a día en las compañías ferroviarias. Por esto, es que antes de realizar cualquier inversión en tecnología ferroviaria, se debe consultar con los diferentes proveedores de los servicios o soluciones necesarios.

Independiente del tipo de sector, tipo de empresa o tamaño, toda compañía debe contar con departamentos o área de mantenimiento que se encarguen de sostener la vida útil de sus equipos y mantenerlos en perfectas condiciones de funcionamiento.

Gracias al mantenimiento las empresas puedan ahorrar gran cantidad de dinero ya que la última solución para que un equipo o máquina funcione u opere a la perfección, no es el cambio de estas sino la buena inspección y cuidado de sus sistemas y componentes. Aunque no se puede olvidar que en muchos casos se debe recurrir al cambio total de los equipos.

BIBLIOGRAFÍA

@ ECS Esveld Consulting Services BV. (2011). @ *ECS Esveld Consulting Services BV*. Obtenido de @ ECS Esveld Consulting Services BV: <http://www.esveld.com/>

@ GOOGLE. (2011). @ *GOOGLE*. Obtenido de @ *GOOGLE Maps*: <http://maps.google.com/>

@ *IMAGINE*. (s.f.). @ *IMAGINE*. Recuperado el Febrero de 2011, de Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment: <http://www.imagine-project.org/>

@ *KOLTECH*. (2011). @ *KOLTECH*. Recuperado el Febrero de 2011, de @*KOLTECH*: <http://www.koltech.com.pl>

@ *Metro de Medellín*. (2011). @ *Metro De Medellín*. Recuperado el 20 de 01 de 2011, de www.metrodemedellin.org.co

@ *MRX TECHNOLOGIES*. (2011). @ *MRX TECHNOLOGIES*. Recuperado el Febrero de 2011, de @ *MRX TECHNOLOGIES*: <http://www.mrxtech.com.au/>

@ *NEM Solutions*. (2011). @ *NEM Solutions the intelligent maintenance*. Recuperado el Febrero de 2011, de @ *NEM Solutions the intelligent maintenance*: http://www.nemsolutions.com/?page_id=31&lang=es

@ *NTMK*. (2006). @ *EVRAZ making the world stronger*. Recuperado el Febrero de 2011, de @ *NTMK, Nizhniy Tagil Iron and Steel Works* : <http://www.ntmk.ru/en/about/geography2.php>

@*KLW An Interpipe Brand*. (2011). @*KLW An Interpipe Brand*. Recuperado el Febrero de 2011, de @*KLW An Interpipe Brand*: <http://www.klw.biz/en/brand-klw>

@Railway Technical Web Pages. (1998 - 2011). *@Railway Technical Web Pages*. Recuperado el Febrero de 2011, de @Railway Technical Web Pages: <http://www.railway-technical.com>

@Railway Technical Web Pages. (1998-2011). *@Railway Technical Web Pages*. Recuperado el Febrero de 2011, de @Railway Technical Web Pages: <http://www.railway-technical.com>

Álvarez Rodríguez, J. (2010). *El Rodaje en el Ferrocarril, Ejes*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.

Brizuela, J. D. (2011). *Dirección de Planos en Ruedas de Tren por Análisis Ultrasónico del Contacto Rueda-Carril en Condiciones Dinámicas*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Cannon, D., Edel, K., Grassie, S., & Sawley, K. (2003). Rail defects: an overview. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* , 26 (10), 865-886.

Cassidy, P. (2000). A new material for the new century. *Railway Rolling Stock: Railtex International Railway Engineering Conference*.

Conde Mellado, A. (2011). *@ NEM Solutions*. Recuperado el 20 de 01 de 2011, de www.nemsolutions.es

Fernandez Mariscal, G., & Pulido Lizaso, E. (2011). *@ National Instruments Corporation*. Recuperado el 20 de 01 de 2011, de www.ni.com

GEMI, Universidad EAFIT. (2011). *Estudio de rutinas de mantenimiento de ruedas. GEMI-DIAGNO-RT-17*. Universidad EAFIT, Medellín.

GEMI, Universidad EAFIT. (2011). *Estudio técnico de equipos comerciales para la medición para la medición del perfil y los parámetros de las ruedas. GEMI-DIAGNO-RT-02*. Universidad EAFIT, Medellín.

Gordon, J. E. (1995). Simulation of the quenching process of railroad wheels. *11th International Wheelset Congress*. París, Francia.

Gordon, J., & Perlman, A. B. (2001). EFFECTS OF SERVICE CONDITIONS ON THE AS-MANUFACTURED RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION IN COMMUTER CAR WHEELS. *Proceedings of the 13th International Wheelset Congress*, (pág. 7). Roma, Italia.

Herreros Garrido, A. (2010). *Estudio De La Defectologia En Ruedas Ferroviarias*. Proyecto de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.

IDEKO, @. (2011). *IDEKO ik 4 research alliance*. Recuperado el 20 de 01 de 2011, de www.ideko.es

Ishizuka, H. (1999). Probability of Improvement in Routine Inspection Work of Shinkansen Vehicle. *Quarterly Report of RTRI* , 40 (2), 70-73.

ISO5948. (1994). *ISO 5948 - Railway rolling stock material – Ultrasonic acceptance testing*. International Organization for Standardization.

Kang, B., & Lee, C. (2004). The Influences of the Wheel Profiles on the Wheel Wear and Vibrational Characteristics of the Passenger Cars Running on the Seoul-Pusan Conventional Line. *JSME International Journal* , 47 (2), 477-481.

Kappes, W., Kröning, M., Rockstroh, B., Salzburger, H. J., & Walte, F. (2000). Non-destructive Testing of Wheel-Sets as a Contribution to Safety of Rail Traffic. *CORENDE 2000 Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales* , (págs. 1-12). Mar del Plata.

Lewis, R., & Braghin, F. (2003). Integrating Dynamics and Wear Modelling to Predict Railway Wheel Profile Evolution. *Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003)*, CM2003 - CHARMEC. Gothenburg, Suecia.

Lewis, R., & Cavalletti, M. (2002). Railway wheel wear predictions with ADAMS/Rail. *Proceedings of the 1th MSC.ADAMS European User Conference, MSC Software Ltd.* London.

Lewis, R., & Dwyer-Joyce, R. (2004). Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. *Proceedings of the 14th International Wheelset Congress.* Orlando, USA.

Mellet, C., Létourneaux, F., & Poisson, F. (2006). High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution. *Journal of Sound and Vibration* , 293 (3-5), 535-546.

Metro de Medellín Ltda. (2011). Talleres, Metro de Medellín Ltda. Medellín , Antioquia, Colombia.

Molina Sánchez, B. (2006). *Estudio de la Creación, Desarrollo y Método de Detección de Grietas en Ruedas Ferroviarias.* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Mora Gutiérrez, A. (2009). *Mantenimiento Estratégico Para Empresas Industriales o de Servicios.* Envigado: AMG.

Nicks, S. (1998). Condition monitoring of the track/train interface. *IEE Seminar Condition Monitoring for Rail Transport Systems.* London.

Rail Safety and Standards Board Limited. (2007). *GM/GN2497: Guidance on Railway Wheelset Tread, Gauging and Damage.* Norma, London.

The Railway Educational Bureau. (2008). *The Basics of Railroad Wheels and Wheel Inspection* (3rd Edition ed.). Omaha, Nebraska, United States of America.

Thompson, D., & Jones, C. (2000). A Review of the Modelling of Wheel/Rail Noise Generation. *Journal of Sound and Vibration* , 231 (3), 519-536.

Vasauskas, V., Bazaras, Ž., & Čapas, V. (2005). Strength anisotropy of railway wheels under contact load. *Mechanika* , 1 (51), 31-38.

Zakharov, S. (2001). Wheel/Rail Performance. En *Guidelines to Best Practice for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues* (págs. 1-86). Virginia Beach, Virginia, USA: International Heavy Haul Association,.

Zerbst, U., Mädler, K., & Hintze, H. (2005). Fracture mechanics in railway applications – an overview. *Engineering Fracture Mechanics* , 72 (2), 163-194.